

Medidor de área foliar utilizando una cámara digital

Sebastián Moreno Valencia

Director

M.Sc. Arley Bejarano Martínez

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de ingenierías Eléctrica, electrónica, física y ciencias de la computación

Programa de Ingeniería Electrónica

2019

Contenido

1.	<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
2.	<i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</i>	3
3.	<i>JUSTIFICACIÓN</i>	5
4.	<i>OBJETIVOS</i>	7
5.	<i>ESTADO DEL ARTE</i>	8
6.	<i>MARCO TEÓRICO</i>	11
6.1.	<i>Método de calibración de la cámara de Zhang</i>	11
6.2.	<i>Mínimos cuadrados</i>	13
6.3.	<i>Espacios de colores</i>	14
6.3.1.	<i>Imágenes en escala de grises</i>	15
6.3.2.	<i>Espacio de color HSV</i>	16
6.3.3.	<i>Espacio de color NTSC</i>	16
6.4.	<i>Método de umbralización</i>	17
6.5.	<i>Histograma en imágenes</i>	18
6.6.	<i>Corrección gamma</i>	18
6.7.	<i>Operaciones morfológicas</i>	20
6.8.	<i>Conjuntos conectados</i>	22
6.8.1.	<i>Píxeles conectados</i>	22
6.8.2.	<i>Vecindad-4:</i>	22
6.8.3.	<i>Vecindad-8:</i>	22
6.8.4.	<i>Componente conectado:</i>	22
6.9.	<i>K-Means</i>	23
7.	<i>DESARROLLO</i>	25

7.1.	<i>Desarrollo metodológico</i>	25
7.2.	<i>Sistema mecánico</i>	26
7.2.1.	<i>Movimiento angular</i>	27
7.2.2.	<i>Movimiento horizontal</i>	28
7.2.3.	<i>Control con Arduino uno</i>	28
7.3.	<i>Calibración de la cámara digital.</i>	29
7.3.1.	<i>Algoritmo calibración de la cámara digital</i>	30
7.3.2.	<i>Algoritmo del cálculo del área conocida</i>	31
7.4.	<i>Algoritmo de segmentación.</i>	32
7.4.1.	<i>Segmentación área foliar.</i>	33
7.4.2.	<i>Segmentación adaptativa</i>	35
7.5.	<i>Validación</i>	37
8.	<i>ANÁLISIS Y RESULTADOS</i>	38
9.	<i>CONCLUSIONES</i>	54
10.	<i>TRABAJOS FUTUROS</i>	55
11.	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	56

Índice de figuras

<i>Figura 1 Modelo “pinhole” para la cámara [8].</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2 Matriz e imagen en escala de grises [10].</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3 Umbralización de imagen bimodal [10].</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4 Curvas gamma para $\gamma = \{0.45, 1, 2.2\}$ [11].</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5 Ejemplos de corrección gamma [11].</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6 operación de dilatación [12].</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7 operación de erosión [12].</i>	<i>21</i>
<i>Figura 8 ejemplos de (a) pixeles con vecindad-4, (b) pixeles con vecindad-8, y (c) componentes conectados [12].</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9 Separación de datos por medio de K-Means.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 10 Metodología planteada para la realización de este trabajo.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11 Sistema mecánico.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 12 Movimientos angulares del tablero de damas.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 13 Servomotores del tablero de damas.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 14 Movimiento horizontal del tablero de damas.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15 Algoritmo implementado en el microcontrolador de Arduino uno.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 16 Algoritmo de la calibración de la cámara digital.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 17 Algoritmo del cálculo del área conocida.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 18 Algoritmo de segmentación del área foliar.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19 Medición de área foliar en la interfaz gráfica.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 20 Algoritmo de segmentación adaptativa.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 21 Segmentación seleccionada de la hoja de plátano.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 22 Mediciones método conteo por cuadrículas de A y B.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 23 Mediciones método conteo por cuadrículas de C y D.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 24 Mediciones método conteo por cuadrículas de E y F.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 25 Mediciones método conteo por cuadrículas de G y H.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 26 Mediciones método conteo por cuadrículas de I y J.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 27 Proceso de calibración de la cámara digital.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 28 Proceso de cálculo de área foliar.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 29 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja A.</i>	<i>44</i>

<i>Figura 30</i>	<i>Proceso de cálculo de área foliar para la hoja B.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 31</i>	<i>Proceso de cálculo de área foliar para la hoja C.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 32</i>	<i>Proceso de cálculo de área foliar para la hoja D.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 33</i>	<i>Proceso de cálculo de área foliar para la hoja E.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 34</i>	<i>Proceso de cálculo de área foliar para la hoja F.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 35</i>	<i>Proceso de cálculo de área foliar para la hoja G.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 36</i>	<i>Proceso de cálculo de área foliar para la hoja H.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 37</i>	<i>Proceso de cálculo de área foliar para la hoja I.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 38</i>	<i>Proceso de cálculo de área foliar para la hoja J.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 39</i>	<i>Proceso de segmentación adaptativa.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 40</i>	<i>Área seleccionada en la segmentación adaptativa.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 41</i>	<i>Área seleccionada segmentada en la segmentación adaptativa.</i>	<i>52</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Resultados de área foliar para la hoja A.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 2 Resultados de área foliar para la hoja B.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 3 Resultados de área foliar para la hoja C.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 4 Resultados de área foliar para la hoja D</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5 Resultados de área foliar para la hoja E.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 6 Resultados de área foliar para la hoja F.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 7 Resultados de área foliar para la hoja G</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8 Resultados de área foliar para la hoja H</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 9 Resultados de área foliar para la hoja I.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 10 Resultados de área foliar para la hoja J</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 11 Error del medidor desarrollado.....</i>	<i>50</i>

Dedicatoria

Dedico a

*Mis padres, por ser mis consejeros, mis acompañantes
y por darme un apoyo incondicional incomparable
durante todo este trayecto de mi vida.*

Agradecimientos

Primero doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta este lugar, gracias a mis padres María Nancy Valencia y Luis Fernando Moreno por su incondicional apoyo, amor y acompañamiento son lo más grande de mi vida junto a mi hermano Santiago Moreno Valencia ser tierno y amoroso el mejor hermano, también gracias a mi esposa Katherine Ocampo Fernández por su absoluto apoyo, amor y el haberme regalado a mi hijo Thiago Moreno Ocampo son muy importantes en mi vida llenan mis días de felicidad, gracias a la Universidad Tecnológica de Pereira por formarme en un profesional y permitirme llegar hasta esta meta. Un especial agradecimiento a mi director Arley Bejarano Martínez por su constante acompañamiento y tan importante dirección en este proceso, finalmente gracias a todos los profesores, familiares y amigos que me brindaron de su ayuda en esta meta.

RESUMEN

En el presente documento se lleva a cabo el análisis de la medición de área foliar en las hojas de plátano. El área de la hoja tiene una gran influencia en el producto del cultivo, y es un índice clave en el desenlace de la producción. Durante los procesos agrícolas como el monitoreo de los cultivos se han tenido ineficiencia para la medición del área foliar, cuando se hace manual el proceso es muy laborioso y necesita de mucho tiempo, no obstante, las prestaciones de los servicios no son los adecuados.

En esta circunstancia en el trabajo desarrollado se implementa un medidor de área foliar en condiciones de medir mediante técnicas de procesamiento de imágenes. Implica un procedimiento de adquisición de imagen, denotada en el documento como calibración de la cámara digital, la cual comprende los elementos necesarios para proyectar geométricamente las imágenes a un medio que se puedan procesar. Este medio de interacción se hace a fin de extraer el área de interés de la imagen (*segmentación*). En síntesis, es importante realizar una exhausta segmentación y de acuerdo se tendrá rigurosidad con la obtención del área a segmentar. En el proceso desarrollado se implementa una metodología estructurada en donde se hace una validación del medidor por medio de una comparación de resultados, con un proceso de medición manual altamente laborioso.

Finalmente aplicando las técnicas anteriores se logra obtener el área foliar de la hoja con un error promedio del 2.96 ± 1.2 , cabe resaltar que el medidor aporta optimización de tiempo e incluso exactitud en procesos de producción agrícola.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país privilegiado por su ubicación geográfica, variedad cultural, climas diversos, flora, fauna, cuencas hidrográficas y recursos naturales. Tales fortalezas han hecho que la agricultura colombiana sea una fuente de ingresos para una parte de sus habitantes. La agricultura juega un papel muy importante en el desarrollo económico del país, pues es la principal fuente de ingresos del área rural, hace un aporte significativo al avance económico, la mitigación de la pobreza, la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible de Colombia [1]. Como la agricultura tiene un gran impacto en la economía Colombiana, se hace necesario buscar métodos que permitan aumentar la producción agrícola. El rendimiento de la producción depende del crecimiento de la planta que se ve afectado por la luz, la temperatura, el agua y los nutrientes minerales. El crecimiento de la planta depende del área foliar, el número de hojas y tallo, el ancho del tallo y la altura de la planta [2].

El área de la hoja tiene una gran influencia en el producto del cultivo, y es un índice clave en el crecimiento del cultivo y la práctica de reproducción. Entonces, cómo medir el área foliar de la planta de forma rápida, precisa y no destructiva tiene un significado muy importante para la producción agrícola moderna [3].

La determinación del área foliar, se puede realizar por métodos directos e indirectos. Dentro del primer grupo se destacan las mediciones de hojas a partir de siluetas formadas por los bordes, las cuales son estampadas en papel para la posterior medición de sus atributos, ya sea por la relación peso-área de figuras circulares o cuadradas, o por fotocopiado sobre papel milimetrado; este método ha sido usado históricamente con altos niveles de precisión y con facilidades de realizarlo sin muestreo destructivo. Sin embargo, la mayor desventaja consiste en que la medición es casi imposible de realizar en hojas divididas y con figuras irregulares. Existen métodos estándares, donde las hojas se aproximan a figuras geométricas regulares, cuyas áreas son fáciles de calcular. La alta velocidad para realizar mediciones es la principal ventaja, pero tienen la dificultad de ser muy poco precisos y la subjetividad a la hora de escoger la forma geométrica adecuada en hojas, que, por lo general, son irregulares. Esto conlleva a que las mediciones no representen la realidad del tamaño del área foliar de la planta. Los planímetros son usados en la actualidad como métodos

indirectos de medición del área foliar. Presentan ciertas ventajas, como rapidez para obtener datos y alta eficiencia en el procesamiento de muestras, pero no son precisos, debido principalmente a las propiedades ópticas de la hoja y la dependencia de fuentes de energía. Cuando los instrumentos son estáticos se requiere de muestreo destructivo, y en algunos casos cuando son portables, no pueden ser usados con hojas de gran tamaño en la lámina foliar [4].

Por otro lado, se han desarrollado métodos para los cuales se obtienen fotografías de hojas por medio de cámaras digitales, y se utilizan programas de computadora para el procesamiento de dichas imágenes. Estos métodos proporcionan un cálculo automático de las áreas foliares y de las áreas perdidas por herbívoros o enfermedades, de manera rápida precisa y a un bajo costo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El área foliar es un parámetro útil para detectar factores relacionados con las plantas como el daño causado por enfermedades e insectos, tasa de crecimiento de la planta, consumo de energía del sol, espacio entre plantas, entre otros. [5]. De esta manera, la medición del área foliar es crucial para proporcionar un marco para la investigación futura en áreas como agronomía, ecología, investigación del ciclo del carbono, actividad de pesticidas e interacción de insectos vegetales [6]. Además, una medición rápida, precisa y no destructiva del área foliar de la planta tiene un significado muy importante para la producción agrícola moderna [3].

Se han desarrollado varios métodos para medir el área de la hoja. Estos métodos se clasifican en directos e indirectos, dependiendo de si el área se mide propiamente sobre el material o a partir de otros parámetros; y en destructivos o no destructivos dependiendo si es necesario o no cortar las hojas de la planta para realizar la medición. Entre los métodos más comunes se destacan el método de conteo de cuadrícula, el método gravimétrico y el planímetro.

El método de conteo de cuadrícula consiste en retirar la hoja de la planta, colocarla en un papel cuadriculado y dibujar a lápiz los contornos de la hoja. Finalmente, el área se mide contando las cuadrículas cubiertas por la hoja. Este método es preciso, pero conlleva mucho tiempo y esfuerzo cuando se aplica en una gran cantidad de hojas. El método gravimétrico consiste primero en retirar la hoja de la planta y colocarla sobre un papel blanco. El papel se corta según la forma de la hoja. Finalmente, el peso de este papel se compara con el peso de otro papel con área conocida. Este método también es trabajoso y requiere mucho tiempo cuando se aplica en una gran cantidad de hojas. El planímetro ofrece una técnica que consume menos tiempo, pero la precisión es limitada, especialmente para hojas relativamente pequeñas. [2].

Por otro lado, existen métodos menos costosos que involucran el procesamiento de imágenes basado en imágenes de cámaras de video y programas de computadora para el análisis de estas imágenes, y han sido alternativas para todas las otras técnicas para la evaluación del área de la hoja. Estos métodos proporcionan un cálculo automático de las áreas foliares y de las áreas perdidas por herbívoros o enfermedades, según los programas informáticos utilizados. [6].

A partir de lo anterior, se puede determinar que los métodos descritos para medir el área foliar que no utilizan procesamiento de imágenes conllevan procesos que requieren de mucho tiempo y trabajo para realizarlos, además, dichos problemas pueden ser solucionados utilizando métodos basados en procesamiento de imágenes, los cuales brindan la posibilidad de extraer otro tipo de información útil de las plantas.

De esta manera, se realiza un medidor de área foliar basado en la aplicación de técnicas de procesamiento de imágenes. Para este fin, se utiliza una cámara digital para adquirir las imágenes de la planta, métodos de pre procesamiento para acondicionar las imágenes y finalmente técnicas de procesamiento como segmentación y operaciones morfológicas para el cálculo del área foliar. Este sistema permite principalmente disminuir el tiempo de cálculo y aumentar la precisión de la medida, además determinar el área foliar afectada por enfermedades.

3. JUSTIFICACIÓN

Para la medición del área foliar, se han desarrollado diferentes métodos entre los cuales se destacan: el método de conteo de cuadrícula, el método gravimétrico y el planímetro. Estos métodos son manuales y destructivos, ya que requieren de cortar la hoja de la planta para realizar la medición. Existen también métodos automáticos basados en la adquisición y procesamiento de imágenes de plantas.

El método de conteo de cuadrícula consiste en colocar la hoja cortada en un papel cuadriculado y dibujar a lápiz los contornos de la hoja. Finalmente, el área se mide contando las cuadrículas cubiertas por la hoja. El método gravimétrico consiste primero en retirar la hoja de la planta y colocarla sobre un papel blanco. El papel se corta según la forma de la hoja. Finalmente, el peso de este papel se compara con el peso de otro papel con área conocida [2]. El planímetro ofrece una técnica para el cálculo de áreas irregulares, pero la precisión es limitada, especialmente para hojas relativamente pequeñas. Los dos primeros métodos mencionados ofrecen alta precisión, pero requieren mucho trabajo y tiempo para realizarlos. Por su parte, el planímetro permite un cálculo más rápido y menos trabajoso, pero sin la misma precisión.

Los métodos automáticos involucran la adquisición y procesamiento de imágenes y han sido alternativas para todas las otras técnicas para la evaluación del área de la hoja. Estos métodos, a diferencia de los métodos manuales descritos proporcionan un cálculo automático de las áreas foliares y reducen el esfuerzo y tiempo requerido. Además, brindan la posibilidad de calcular las áreas perdidas por herbívoros o enfermedades, según los programas informáticos utilizados.

Por lo tanto, se realiza un medidor de área foliar basado en la aplicación de técnicas de procesamiento de imágenes. Para este fin, se utiliza una cámara digital para adquirir las imágenes de la planta, métodos de pre procesamiento para acondicionar las imágenes y finalmente técnicas de procesamiento como segmentación y operaciones morfológicas para el cálculo del área foliar. Este sistema permite principalmente disminuir el tiempo de cálculo y aumentar la precisión de la medida, además determinar el área foliar afectada por enfermedades.

Con el desarrollo de este proyecto se logra establecer un nuevo método para el cálculo del área foliar de manera rápida y a un bajo costo, lo que se consolida como una importante ayuda a los agricultores pues establece una mejora en el rendimiento en la producción agrícola.

Los resultados de esta investigación podrían ser un incentivo para la búsqueda de nuevos métodos y técnicas que permitan mejorar el rendimiento de los sistemas de medición del área foliar, con el propósito de convertirlos en una herramienta confiable para los agricultores y permitir el mejoramiento de su producción.

Este proyecto además de estar asociado a la agricultura, tiene una estrecha relación con el área de procesamiento de imágenes, puesto que se busca aplicar técnicas de segmentación y operaciones morfológicas. Por lo tanto, los resultados que se obtengan en esta investigación podrían traer beneficios a las diferentes áreas del conocimiento que usan estos conceptos y técnicas.

4. OBJETIVOS

General:

Desarrollo e Implementación de un medidor de área foliar utilizando una cámara digital.

Específicos:

- Construir el sistema mecánico que permitirá la calibración de la cámara y la captura de la imagen.
- Implementar el algoritmo de calibración de la cámara digital utilizando el diseño mecánico del objetivo anterior.
- Desarrollar e implementar un algoritmo de segmentación para reconocer un patrón repetitivo de color en el área foliar de la hoja de plátano.
- Validar estadísticamente el funcionamiento del sistema diseñado.

5. ESTADO DEL ARTE

La medición del área foliar representa una gran importancia para algunas áreas como la agronomía, ecología, investigación del ciclo del carbono, actividad de pesticidas e interacción de insectos vegetales [6]. Además, una medición rápida, precisa y no destructiva del área foliar de la planta tiene un significado muy importante para la producción agrícola moderna [3].

Se han desarrollado varios métodos para medir el área foliar. Entre los métodos más comunes se destacan el método de conteo de cuadrícula, el método gravimétrico y el planímetro.

El método de conteo de cuadrícula consiste en dibujar a lápiz los contornos de la hoja sobre un papel cuadriculado y obtener el área foliar contando las cuadrículas cubiertas por la hoja. Este método es preciso pero laborioso y requiere mucho tiempo cuando se aplica en una gran cantidad de hojas. El método gravimétrico consiste primero en retirar la hoja de la planta y colocarla sobre un papel blanco, el cual se corta según la forma de la hoja. Finalmente, el peso de este papel se compara con el peso de otro papel con área conocida. Este método presenta los mismos problemas del método anterior. El planímetro ofrece una técnica que consume menos tiempo, pero la precisión es limitada, especialmente para hojas relativamente pequeñas. Además, el planímetro tiene un precio alto [2].

Por otro lado, existen métodos menos costosos que involucran el procesamiento de imágenes basado en imágenes de cámaras de video y programas de computadora para el análisis de estas imágenes, y han sido alternativas para todas las otras técnicas de la evaluación del área de la hoja. Estos métodos proporcionan un cálculo automático de las áreas foliares y de las áreas perdidas por herbívoros o enfermedades, según los programas informáticos utilizados. [6]. En la literatura se presentan principalmente los siguientes métodos basados en procesamiento de imágenes:

[3] propone un método de medición no destructivo, para el cual se corrigen las distorsiones geométricas de la imagen. Luego, se segmenta la imagen utilizando el método de umbral y se presenta un nuevo enfoque de extracción de contorno para eliminar la influencia de agujeros en la hoja. Después, se implementa escaneo de píxeles de un lado al lado opuesto en cuatro direcciones

para extraer el contorno del objeto. Finalmente, el área de la hoja se mide por la estadística del número de píxeles.

En [2] la imagen de la planta se adquiere con una cámara digital y se almacena en formato JPEG. La imagen RGB se transforma al espacio de color CIELAB. La imagen transformada en color se segmenta mediante la técnica de umbral, el cual se calcula utilizando el método de OTSU. Finalmente, se eliminan los agujeros de la hoja mediante la técnica de rellenado de región y se calcula el área foliar mediante estadística de píxeles.

[7] propone mejorar la precisión utilizando un método de medición del área foliar de la planta basado en el modelo Snake. Se captura el contorno de las hojas con el modelo Snake mejorado, se genera una tabla de códigos de cadena de 8 direcciones, se calcula el área de la hoja con los píxeles en el contorno de la hoja y se visualizan los resultados estadísticos con el histograma de área.

[6] plantea un algoritmo basado en el conteo de píxeles. Se redimensiona la imagen dada a 400x400 píxeles, dado que las imágenes tienen como referencia el tamaño del papel A4 como fondo, la reducción del tamaño de la imagen no afecta los resultados y ayuda a reducir el tiempo de cálculo. Se convierte la imagen a escala de grises aplicando un umbral determinado. Se detecta la posición del papel de fondo A4 y recorta la imagen. Finalmente se cuentan todos los píxeles negros y se calcula el área foliar.

En [18] se realiza una investigación en la cual se evalúa el uso de una cámara web, la cámara incorporada en un teléfono celular y una cámara digital semiprofesional para determinar el área foliar a partir del análisis computarizado de fotografías de hojas. Para el análisis de imágenes se utiliza *ImageJ*, un software libre que permite determinar el área de objetos gráficos en los que se introduce una referencia de tamaño conocido. Acoplando estos elementos para la medición del área u otros parámetros de crecimiento foliar, se tiene un sistema portátil, económico y preciso que apoya la investigación y toma de decisiones, aún en lugares con recursos tecnológicos muy limitados. Para evaluar la eficacia del método se seleccionan cinco especies vegetales con hojas diferentes morfológicamente. Los resultados indican que a partir de estas fotografías puede medirse

el área foliar en forma relativamente rápida, precisa y a bajo costo, en comparación con el uso de medidores de área foliar, utilizados tradicionalmente en las investigaciones.

[16] desarrolla el software “Easy Leaf Area” para estimar rápidamente el área foliar de la planta *Arabidopsis* (DC.) Heynh, utilizando una combinación de umbrales, proporciones de color y análisis de componentes conectados para medir rápidamente el área de la hoja en imágenes individuales en segundos, o procesar por lotes cientos de imágenes en minutos; los resultados se guardan en un archivo CSV listo para hojas de cálculo. Cada imagen analizada también se guarda en formato TIFF sin pérdidas para proporcionar un registro visual de la medición del área de la hoja y para facilitar análisis adicionales. Easy Leaf Area se escribió en Python, un lenguaje de programación gratuito y de código abierto con procesamiento de imágenes y herramientas matemáticas, y es fácil de modificar para adaptarse a los requisitos experimentales específicos.

En [15] se realiza el diseño de un sistema portátil similar a un escáner de mano que se pueda usar para escanear una hoja y obtener una medición de su área, tamaño y forma y, opcionalmente áreas enfermas. El sistema utiliza una placa beagle conectada a un sensor de escaneo de línea, a un panel de pantalla LCD / LED y un teclado táctil. El sistema es portátil o acoplable a un transportador portátil. Los resultados se almacenan a bordo o se pueden transferir a través de un modo opcionalmente inalámbrico a un computador de escritorio.

[17] propone un Medidor de área de hoja (LAM) que consiste en una aplicación de software de procesamiento de imágenes basada en Java. La aplicación de software tiene muchas ventajas, como fácil de usar, rápida, precisa y reutilizable. Además, se discuten diferentes métodos de estimación del área de la hoja como la máquina Li 3100, el método basado en gráficos manuales y el método basado en software. Finalmente, los resultados muestran que el software LAM proporciona resultados precisos de 99.96% a 95.31% para diferentes hojas, excepto Jasud.

6. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se encuentran los conceptos teóricos utilizados para desarrollar el trabajo del propuesto.

6.1. Método de calibración de la cámara de Zhang

El método de Zhang usa el modelo de cámara "pinhole" para relacionar las coordenadas 3D del mundo real con las de la imagen 2D en el plano de la cámara [8]. La relación matemática entre los puntos reales y los de la imagen se realiza a través de cuatro transformaciones, mediante las coordenadas del mundo real (X_w, Y_w, Z_w) , las coordenadas de la cámara (X_c, Y_c, Z_c) , las coordenadas de la imagen sin distorsión (x_u, y_u) , las coordenadas de la imagen distorsionada (x_d, y_d) y las coordenadas en píxeles (u, v) sobre la imagen. Estos sistemas coordenados son mostrados en la *Figura 1*.

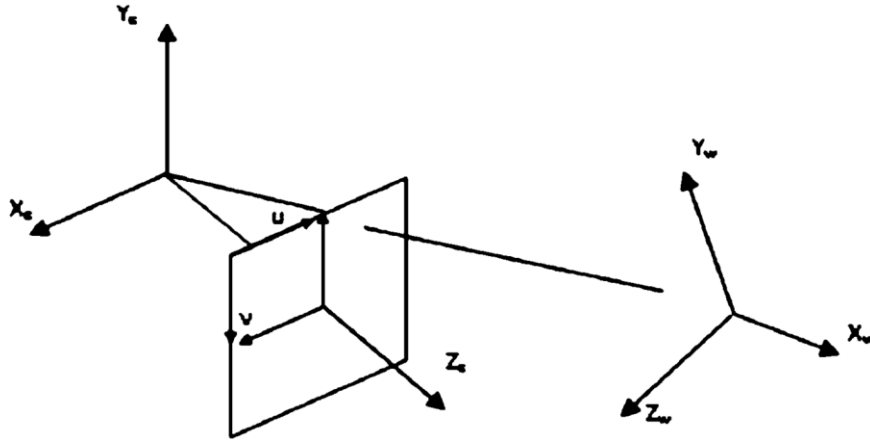


Figura 1 Modelo "pinhole" para la cámara [8].

La primera transformación entre las coordenadas reales (X_w, Y_w, Z_w) , y las coordenadas de la cámara (X_c, Y_c, Z_c) , se realiza con la posición y orientación de la cámara, expresada por los parámetros extrínsecos R y t , así:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + t \quad (1)$$

R es una matriz 3x3 de rotación y t es un vector de translación. Las otras tres transformaciones desde las coordenadas de la cámara (X_c, Y_c, Z_c) a coordenadas pixel (u, v) son controladas por la configuración interna de la cámara definida en (2) y (3).

$$\begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

La transformación entre las coordenadas de la imagen sin distorsiones (x_u, y_u) y las coordenadas de la imagen distorsionada (x_d, y_d) es controlada por la fórmula matemática que define las distorsiones geométricas de la lente empleada para formar la imagen. La fórmula más usada para distorsiones radiales y tangenciales es:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = [1 + k_c(1)r^2 + k_c(2)r^4 + k_c(5)r^6] \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_c(3)x_u y_u + k_c(4)(r^2 + 2x_u^2) \\ 2k_c(4)x_u y_u + k_c(3)(r^2 + 2y_u^2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Así, los parámetros intrínsecos son: el centro de la imagen (x_o, y_o); las focales de la lente en pixeles a lo largo del eje X y Y, f_x y f_y ; el parámetro de inclinación γ de los ejes de la cámara y cinco coeficientes de distorsión de la imagen, k_c . En el método de Zhang, el plano de calibración es ubicado en varias orientaciones y se asume que para los puntos de control $Z_w=0$. Por lo tanto, un punto de control y su imagen están relacionados por:

$$sm = HM, \quad m = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad H = A[r_1 r_2 t], \quad A = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde r_i denota la columna i de la matriz de rotación R. La transformación entre las coordenadas sin distorsión y distorsionadas se determina con (4). El objetivo de un procedimiento de calibración es determinar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, estimando la matriz homográfica H. Para cada imagen del patrón se determinan por tratamiento de imágenes las coordenadas en pixeles de los puntos de control, vector m. Como se conocen las dimensiones

métricas del patrón empleado, se asume que para cada punto de control se conoce el vector M . Un procedimiento de optimización es empleado para estimar H . La función usada en el proceso de optimización es usualmente el error métrico entre las coordenadas de los puntos de control calculadas por tratamiento digital de imágenes (u_i, v_i) y las coordenadas estimadas (\hat{u}_i, \hat{v}_i):

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(\hat{u}_i - u_i)^2 + (\hat{v}_i - v_i)^2} \quad (5)$$

6.2. Mínimos cuadrados

El método del mínimo cuadrado se usa ampliamente para encontrar o estimar los valores numéricos de los parámetros para ajustar una función a un conjunto de datos y caracterizar las propiedades estadísticas de las estimaciones. Existe con varias variaciones: su versión más simple se llama mínimos cuadrados ordinarios (OLS), una versión más sofisticada se llama mínimos cuadrados ponderados (WLS), que a menudo funciona mejor que OLS porque puede modular la importancia de cada observación en la solución final. Las variaciones recientes del método de mínimos cuadrados son mínimos cuadrados alternos (ALS) y mínimos cuadrados parciales (PLS).

Ejemplo de ajuste funcional: regresión

El uso más antiguo (y aún más frecuente) de OLS fue la regresión lineal, que corresponde al problema de encontrar una línea (o curva) que mejor se ajuste a un conjunto de datos. En la formulación estándar, se utiliza un conjunto de N pares de observaciones $\{Y_i, X_i\}$ para encontrar una función que proporcione el valor de la variable dependiente (Y) a partir de valores de una variable independiente (X). Con una variable y una función lineal, la predicción viene dada por la siguiente ecuación:

$$\hat{Y} = a + bX \quad (6)$$

Esta ecuación involucra dos parámetros libres que especifican la intersección (a) y la pendiente (b) de la línea de regresión. El método de mínimos cuadrados define la estimación de estos parámetros como los valores que minimizan la suma de los cuadrados (de ahí el nombre de mínimos cuadrados) entre las mediciones y el modelo (es decir, los valores predichos). Esto equivale a minimizar la expresión:

$$\varepsilon = \sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_i [Y_i - (a + bX_i)]^2 \quad (7)$$

Donde ε significa "error", que es la cantidad que se debe minimizar). Esto se logra utilizando técnicas estándar de cálculo, esto es, la propiedad de que una fórmula cuadrática (es decir, con un cuadrado) alcanza su valor mínimo cuando sus derivados desaparecen. Tomar la derivada de ε con respecto a (a) y (b) e igualarla a cero da el siguiente conjunto de ecuaciones (llamadas ecuaciones normales):

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} &= 2Na + 2b \sum X_i - 2 \sum Y_i = 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} &= 2b \sum X_i^2 + 2a \sum X_i - 2 \sum X_i Y_i = 0\end{aligned}$$

Resolviendo las anteriores ecuaciones se obtiene las estimaciones de mínimos cuadrados de a y b :

$$a = M_Y - bM_X \quad (8)$$

(Con M_Y y M_X denotando el resultado de X y Y) y

$$b = \frac{\sum (Y_i - M_Y)(X_i - M_X)}{\sum (X_i - M_X)^2} \quad (9)$$

OLS se puede extender a más de una variable independiente (usando álgebra matricial) y a funciones no lineales.

6.3. Espacios de colores

Los modelos de color tienen un sistema de coordenadas de color específico y cada punto en el espacio de color representa solo un color específico. Cada modelo de color puede ser útil para aplicaciones específicas. Las imágenes en color típicas, particularmente las generadas por un sistema de imagen digital, se representan, editadas como rojo, verde, azul y normalmente se denominan imágenes RGB. Son útiles para monitores en color y cámaras de video. Una imagen de color RGB, representada por 8 bits de píxeles R, G y B tiene 256³ o 16,777,216 colores. Hay varios espacios de color como CMYK, HSV, HIS o LUV, etc.

6.3.1. Imágenes en escala de grises

Las imágenes en escala de grises consisten solo en tonos grises de colores, que son solo 256 pasos. En otras palabras, solo hay 256 colores grises. La característica principal de las imágenes en escala de grises es la igualdad de los niveles de color rojo, verde y azul. El código de color será como RGB (R, R, R), RGB (G, G, G) o RGB (B, B, B) donde "R, G, B" es un número entre 0 y 255 individualmente. Para convertir la imagen de RGB a todo color a escala de grises existen muchas formas, por ejemplo:

Calculando el promedio aritmético de los niveles de color rojo, verde y azul de una imagen, se podrá obtener nivel de color gris, que se resolverá mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{New_Red_Color}(x,y) = (\text{Red_Color}(x,y) + \text{Green_Color}(x,y) + \text{Blue_Color}(x,y)) \backslash 3$$

$$\text{New_Green_Color}(x,y) = (\text{Red_Color}(x,y) + \text{Green_Color}(x,y) + \text{Blue_Color}(x,y)) \backslash 3$$

$$\text{New_Blue_Color}(x,y) = (\text{Red_Color}(x,y) + \text{Green_Color}(x,y) + \text{Blue_Color}(x,y)) \backslash 3$$

$$\text{Color_Code}(x,y) = \text{RGB}(\text{New_Red_Color}(x,y), \text{New_Green_Color}(x,y), \text{New_Blue_Color}(x,y)).$$

Donde "\" es "división sin residuo".

Como los tres niveles de color se transforman al mismo nivel, solo habrá una matriz de color [10].

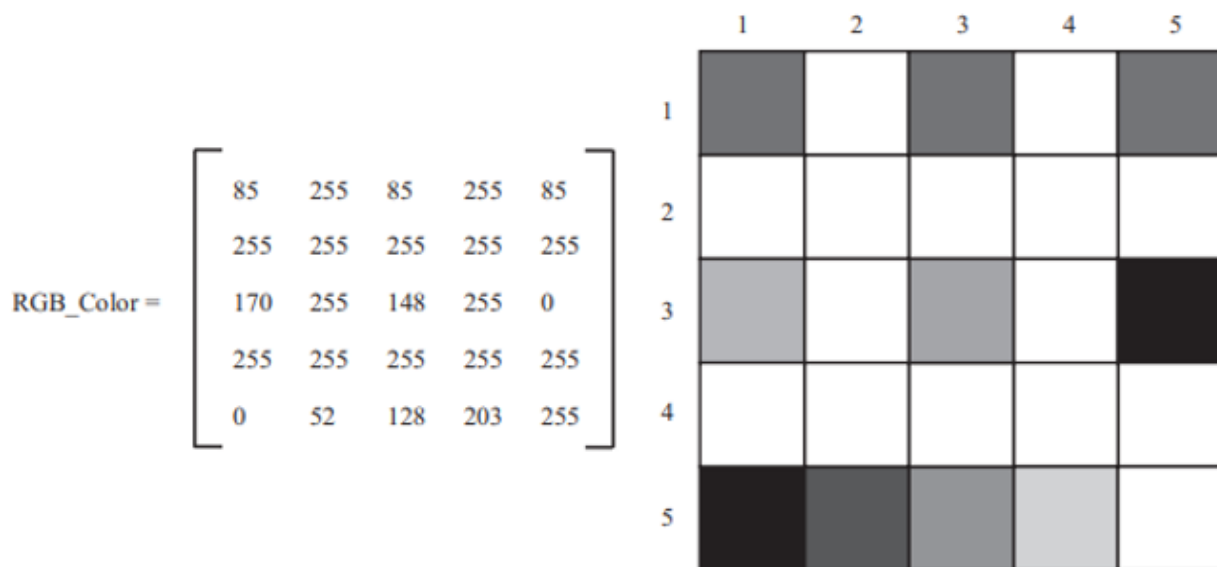


Figura 2 Matriz e imagen en escala de grises [10].

6.3.2. Espacio de color HSV

El espacio de color HSV HSL o HSI es un espacio de color, que describe los colores percibidos por los seres humanos. HSI (o HSV) significa matiz (Hue), saturación (S) e intensidad (I) (o valor V). El matiz ya se ha mencionado como una propiedad de color de la luz. También puede concebirse como una propiedad de la superficie que refleja o transmite la luz. Por ejemplo, un automóvil azul refleja un matiz azul. Además, también es un atributo de la percepción humana. El matiz que es esencialmente el componente cromático de nuestra percepción puede considerarse nuevamente como matiz débil o matiz fuerte. El colorido de un color se describe mediante el componente de saturación. Por ejemplo, el color de una única fuente de luz monocromática, que produce colores de una sola longitud de onda, está altamente saturado, mientras que los colores que comprenden tonalidades de diferentes longitudes de onda tienen poco croma y tienen menos saturación. Los colores grises no tienen matices y, por lo tanto, son de saturación cero o insaturados. La saturación es, por lo tanto, una medida de colorido o blancura en el color percibido. La luminosidad (L) o la intensidad (I) o el valor (V) esencialmente proporcionan una medida del brillo de los colores. Esto proporciona una medida de cuánta luz se refleja desde el objeto o cuánta luz se emite desde una región. Es proporcional a la energía electromagnética radiada por el objeto. La luminosidad (o intensidad) esencialmente ayuda al ojo humano a percibir el color. Un objeto colorido en la oscuridad no parece colorido en absoluto [10].

6.3.3. Espacio de color NTSC

En este espacio de color (también conocido como espacio de color YIQ), la información de luminancia Y representa la información de la escala de grises, mientras que el matiz (I) y la saturación (Q) llevan la información de color. La conversión de RGB a YIQ es:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .299 & .587 & .114 \\ .596 & -.274 & -.322 \\ .211 & -.523 & .312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (10)$$

Los elementos de la primera fila suman 1 y los elementos en la segunda y tercera fila suman 0. Por lo tanto, en una imagen en escala de grises, donde $R = G = B$, los componentes de color I y Q son cero. El espacio de color NTSC se utiliza en televisión [10].

6.4. Método de umbralización

Las técnicas de valor umbral son métodos computacionalmente económicos para dividir una imagen digital en regiones mutuamente excluyentes y exhaustivas. La operación de umbralización implica la identificación de un conjunto de umbrales óptimos, en función de los cuales la imagen se divide en varias regiones significativas.

- Umbral de dos niveles

El umbral de dos niveles se emplea en imágenes que tienen histogramas bimodales. En el umbral de dos niveles, el objeto y el fondo forman dos grupos diferentes con distintos niveles de gris. Por ejemplo:

1. Los caracteres alfanuméricos en un libro son generalmente más oscuros que el papel blanco de fondo.
2. Los cromosomas en una imagen de células mitóticas son más oscuros que el fondo.

En ambos casos, las formas de los histogramas son bimodales con picos correspondientes al objeto y las regiones de fondo y un valle en el medio. El punto del valle generalmente se elige como umbral. En la umbralización bimodal, a todos los valores grises mayores que el umbral T se les asigna la etiqueta del objeto y a todos los demás valores grises se les asigna la etiqueta del fondo, separando así los píxeles del objeto de los píxeles del fondo. Por lo tanto, el umbral es una transformación de una imagen de entrada A en una imagen de salida segmentada B de la siguiente manera:

(a) $b_{ij} = 1$ para $a_{ij} \geq T$

b) $b_{ij} = 0$ para $a_{ij} < T$, donde T es el umbral

En lo anterior, $b_{ij} = 1$ para los píxeles del objeto y $b_{ij} = 0$ para los píxeles de fondo [10]. En la Figura 3, se muestra el umbral de imagen de dos niveles para la imagen de Saturno.



Figura 3 Umbralización de imagen bimodal [10].

6.5. Histograma en imágenes

El histograma de una imagen representa la frecuencia relativa de aparición de los distintos niveles de gris en la imagen. Proporciona principalmente la descripción global de la imagen. Por ejemplo, si el histograma de la imagen es estrecho, significa que la imagen es poco visible porque la diferencia en los niveles de grises presentes en la imagen es generalmente baja. Del mismo modo, un histograma ampliamente distribuido significa que casi todos los niveles de grises están presentes en la imagen y, por lo tanto, aumenta el contraste general y la visibilidad. La forma del histograma de una imagen revela información de contraste importante, que se puede utilizar para mejorar la imagen. Las técnicas de modelado de histograma modifican una imagen para que su histograma tenga la forma deseada. Esto es útil para estirar los niveles de imágenes de bajo contraste con histogramas estrechos. Los métodos de modelado de histogramas utilizados para la mejora pueden clasificarse ampliamente en métodos locales y globales. En los métodos locales, la operación está limitada solo para un número limitado de píxeles o más casualmente dentro de alguna región restringida de la imagen. Los métodos globales, por otro lado, modifican la imagen completa en función de la información general del histograma de la imagen [10].

6.6. Corrección gamma

La corrección gamma se utiliza para corregir las diferencias entre la forma en que una cámara captura el contenido, la forma en que una pantalla muestra el contenido y la forma en que nuestro sistema visual procesa la luz. Nuestros ojos no responden a la luz de la misma manera que una cámara la captura. En términos básicos, si el doble de fotones alcanza un sensor de imagen digital, entonces el voltaje de salida será el doble. Sin embargo, para el caso de las cámaras antiguas basadas en CRT (tubo de rayos catódicos), este no era el caso y había una relación altamente no lineal entre la intensidad de la luz y el voltaje de salida. El HVS también tiene una respuesta muy no lineal a los niveles de luminancia, siendo más sensible a pequeños cambios en áreas más oscuras y mucho menos sensible en áreas claras. Sin corrección, para evitar efectos de bandas debido a saltos perceptibles entre los niveles de codificación, se necesitarían alrededor de 11 bits. Sin embargo, en la mayor parte del extremo superior de la escala, la codificación sería muy redundante ya que los niveles de codificación serían imperceptibles. Con la corrección previa de gamma podemos obtener una representación aceptable con solo 8 bits.

Las características de la visión humana fotópica se pueden aproximar mediante una función de ley de potencia. La corrección de la salida de señal de la cámara utilizando este tipo de función asegura que no se asignen demasiados bits a regiones más brillantes donde los humanos son menos exigentes y más a regiones más oscuras, donde son más. Por lo tanto, las cámaras de video normalmente realizan un mapeo no lineal de la intensidad de la iluminación al valor de salida, proporcionando una escala perceptiva más uniforme con incrementos más finos para valores más oscuros. Esto se conoce como la Característica Gamma del dispositivo, como lo describe la función de transferencia:

$$V = C_1 \Phi^\gamma + C_2 \quad (11)$$

Donde Φ es el flujo luminoso (normalizado) y V es el valor (voltaje) de la señal, C_1 es la sensibilidad de la cámara y C_2 es un valor de compensación. La *Figura 4* muestra gráficos de características de transferencia para tres valores gamma, $\gamma = \{0.45, 1, 2.2\}$. Estos valores son típicos de los utilizados en los sistemas de televisión modernos. La *Figura 5* muestra algunos ejemplos corregidos de una imagen en varios niveles gamma [11].

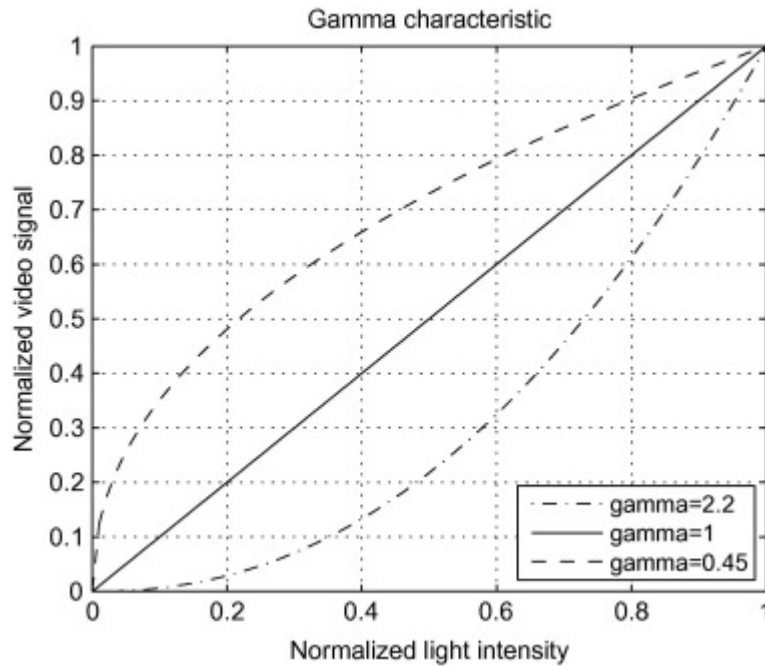


Figura 4 Curvas gamma para $\gamma = \{0.45, 1, 2.2\}$ [11].

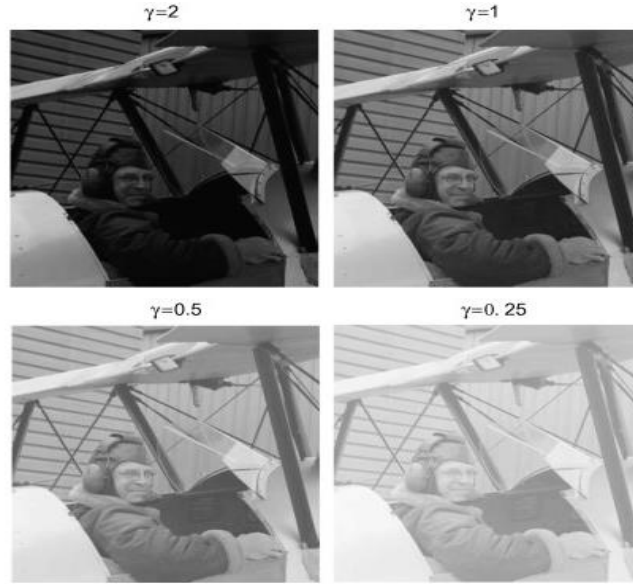


Figura 5 Ejemplos de corrección gamma [11].

6.7. Operaciones morfológicas

La morfología en el contexto del procesamiento de imágenes significa la descripción de la forma y estructura del objeto en una imagen. Las operaciones morfológicas funcionan sobre la base de la teoría de conjuntos y se basan más en el ordenamiento relativo del píxel en lugar de en su valor numérico. Esta característica los hace más útiles para el procesamiento de imágenes. Los datos de entrada para las operaciones morfológicas matemáticas son dos imágenes: imagen sin procesar e imagen primitiva. Las operaciones morfológicas están bien definidas para imágenes binarias, pero son igualmente válidas y también se encuentran útiles para imágenes en escala de grises.

Aunque las operaciones morfológicas se basan en la teoría de conjuntos, muchas de las operaciones morfológicas son básicamente operaciones lógicas y son fáciles de usar. Las operaciones morfológicas fundamentales son la erosión y la dilatación.

▪ Dilatación

La operación de dilatación hace que un objeto crezca por tamaño. La medida en que crece depende de la naturaleza y la forma del elemento estructurante. La dilatación de una imagen A (conjunto) mediante la estructuración del elemento B se define como

$$A \oplus B = \{z | \widehat{B_z} \cap A \neq \emptyset\} \quad (12)$$

La dilatación, como se dijo anteriormente, agrega píxeles a los elementos de límite. El proceso de dilatación aumenta el número de píxeles con valor uno (primer plano) y reduce el número de píxeles con valor cero (fondo). También el proceso de dilatación se usa básicamente para llenar los agujeros (píxeles faltantes) en un objeto continuo. La operación de dilatación, ya que agrega píxeles en el límite del objeto, afecta la intensidad en esa ubicación y, como resultado, se puede observar el efecto de desenfoque [12].

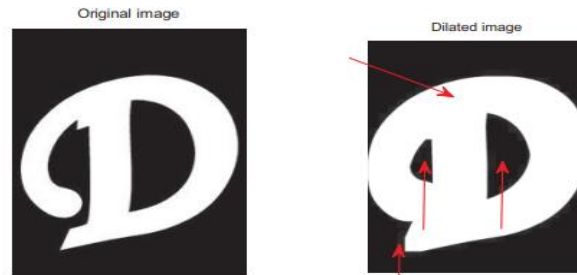


Figura 6 operación de dilatación [12].

▪ Erosión

La operación de erosión es un complemento de la operación de dilatación en contexto con el efecto de la operación. Es decir, la operación de erosión hace que el objeto pierda su tamaño. La erosión de una imagen A por el elemento estructurante B se define como

$$A \ominus B = \{z | B_z \subseteq A\} \quad (13)$$

Esta operación da como resultado la pérdida de píxeles de límite del objeto. El proceso de erosión aumenta el número de píxeles con valor cero (fondo) y reduce el número de píxeles con valor uno (primer plano). La operación de erosión elimina aquellas estructuras que son de menor tamaño que la del elemento estructurante. Por lo tanto, se puede utilizar para eliminar la ruidosa "conexión" entre dos objetos. Dado que los píxeles no deseados se "borran", el efecto neto es la nitidez del objeto en una imagen [12].

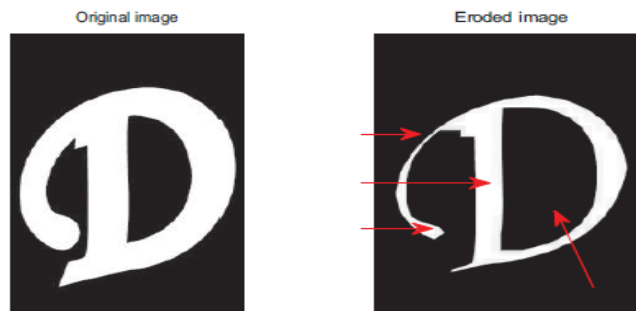


Figura 7 operación de erosión [12].

6.8. Conjuntos conectados

6.8.1. Píxeles conectados

Un píxel P_0 en (i_0, j_0) está conectado a otro píxel P_n en (i_n, j_n) si y solo si existe una ruta de P_0 a P_n , que es una secuencia de puntos $(i_0, j_0), (i_1, j_1), \dots, (i_n, j_n)$ de modo que el píxel en (i_k, j_k) sea vecino del píxel en (i_{k+1}, j_{k+1}) y $P_k = P_{k+1}$ para todos los $k, 0 < k < n - 1$.

6.8.2. Vecindad-4:

Cuando un píxel en la ubicación i, j tiene cuatro vecinos inmediatos en $(i + 1, j), (i - 1, j), (i, j + 1)$ y $(i, j - 1)$ se conocen como vecindad-4. Dos píxeles con vecindad-4 comparten un límite común como se muestra en la *Figura 8(a)*.

6.8.3. Vecindad-8:

Cuando un píxel en la ubicación i, j tiene, además de los cuatro vecinos inmediatos anteriores, un conjunto de cuatro vecinos de esquina en $(i + 1, j + 1), (i + 1, j - 1), (i - 1, j + 1)$ y $(i - 1, j - 1)$ se conocen como vecindad-8. Por lo tanto, dos píxeles tienen vecindad-8 si comparten una esquina común, como se muestra en la *Figura 8 (b)*.

6.8.4. Componente conectado:

Un conjunto de píxeles con vecindad-4 o 8, forma un componente conectado. Tal componente conectado representa un objeto en una escena como se muestra en la *Figura 8 (c)* [12].

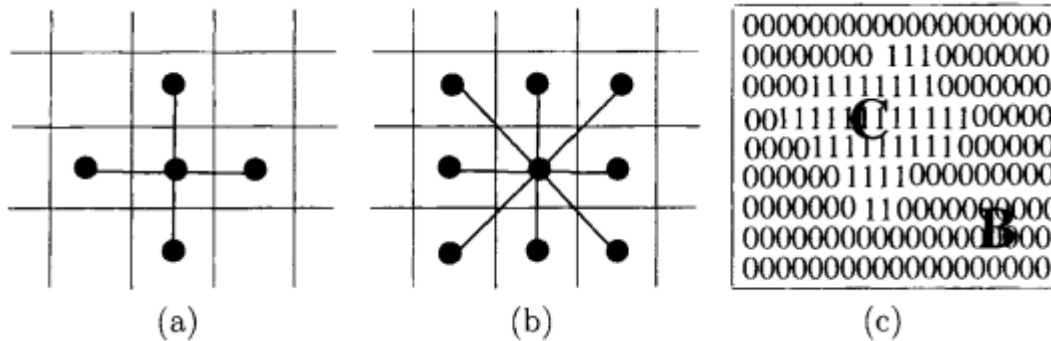


Figura 8 ejemplos de (a) píxeles con vecindad-4, (b) píxeles con vecindad-8, y (c) componentes conectados [12].

6.9. K-Means

Es uno de los métodos de entrenamiento no supervisado más usados para la clasificación de un conjunto de objetos en un número K de grupos. Cada grupo está definido por centroides separados por una distancia euclidiana [13], como se observa en la *Figura 9*. los datos se han agrupado en 5 grupos en función de sus intensidades. Los puntos amarillos representan el centroide de cada grupo el resultado del agrupamiento de los datos en un número K de clusters, donde K=5 en este caso.

Dado un conjunto de observaciones $y = y_1, y_2, \dots, y_i$, el método de K-means tiene como objetivo agrupar j observaciones en $k \leq j$ grupos en los que cada observación pertenece al centroide del grupo más cercano, para la función objetivo P:

$$P = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^j - C_j\|^2 \quad (14)$$

Donde:

- k es el número de grupos
- n es el número de clases
- x_i es el dato a analizar
- C_j es el centroide del grupo j
- P es la función objetivo
- $\|x_i^j - C_j\|^2$ es la distancia euclidiana entre un punto y un centroide.

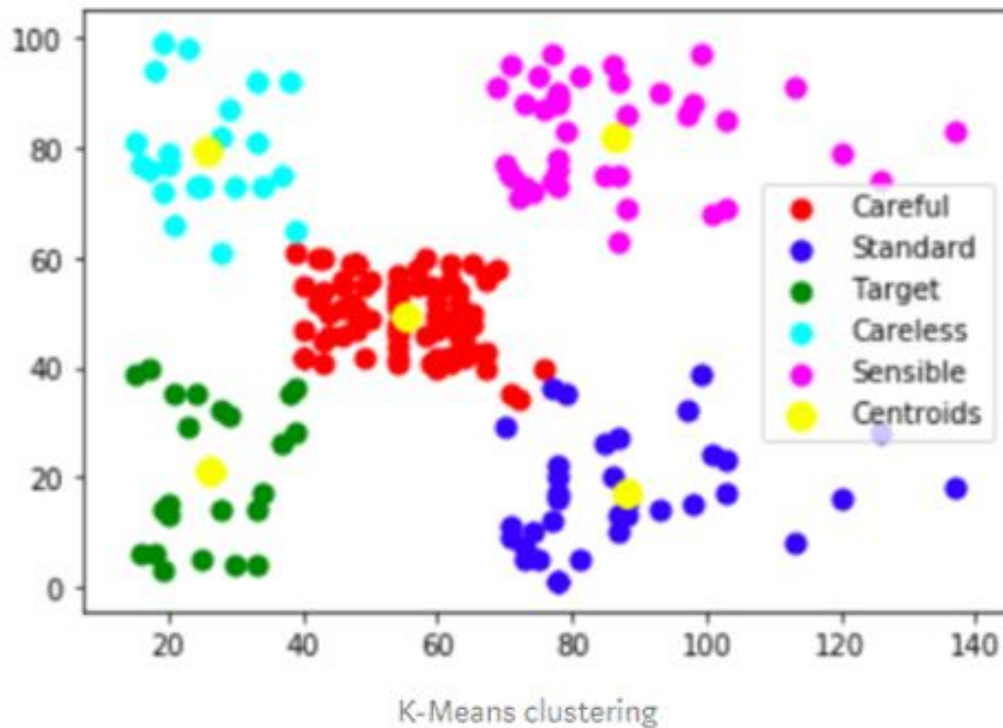


Figura 9 Separación de datos por medio de K-Means.

El algoritmo para determinar K-Means es el siguiente:

- a) Elegir k puntos utilizando una distribución normalizada a partir de los datos con el fin de definir los centroides
- b) Usando la distancia euclidiana calcular y almacenar las distancias entre cada k-centroides.
- c) Basado en la distancia calculada, a cada punto se le asigna el grupo más cercano.
- d) Calcular el promedio de las observaciones en cada grupo para obtener k nuevas ubicaciones de los centroides.
- e) Repetir los pasos de 2 a 4 hasta que las asignaciones de los grupos no cambien o se alcance un número máximo de iteraciones.

7. DESARROLLO

En este capítulo se mostrarán los desarrollos realizados, para llevar a cabo el trabajo, se parte con la construcción del sistema mecánico que permite calibrar la cámara digital, se muestra la programación del algoritmo de calibración de la cámara digital para lograr extraer información de las escenas capturadas por la cámara, como también, en el algoritmo de segmentación se implementan técnicas de procesamiento de imágenes y segmentación adaptativa, finalmente se proporciona una medición del área foliar e incluso una validación entre las mediciones del área foliar del sistema y las mediciones del área foliar manualmente.

7.1. Desarrollo metodológico

La metodología planteada para el desarrollo de este trabajo se muestra en la *Figura 10*.

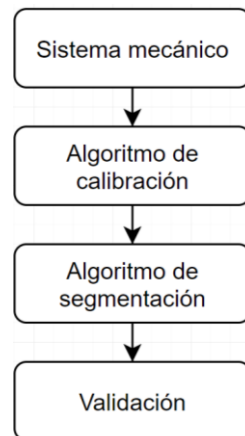


Figura 10 Metodología planteada para la realización de este trabajo.

Con el fin de cumplir con el objetivo general se planteó una metodología estructurada donde se permita abordar las actividades del proyecto.

Para el primer objetivo específico el cual fue: construir el sistema mecánico que permitirá la calibración de la cámara y la captura de la imagen, se implementó un sistema de correa dentada con su respectiva piñonera con el que se realiza un desplazamiento horizontal de una plataforma por unos rieles mediante rodachines, como también, la plataforma es movida angularmente perpendicular a la cámara digital por medio de servomotores. Para el segundo objetivo específico el cual fue: implementar el algoritmo de calibración de la cámara digital utilizando el diseño mecánico del objetivo anterior, se ejecutó el toolbox camera calibration del entorno de desarrollo

Matlab, a fin de tener las dimensiones de la escena tomada por la cámara, para luego en el tercer objetivo específico el cual fue: desarrollar e implementar un algoritmo de segmentación para reconocer un patrón repetitivo de color en el área foliar de la hoja de plátano, programar el algoritmo de segmentación haciendo uso de técnicas de procesamiento de imágenes y segmentación adaptativa, de este modo llevando todo a un procedimiento de validación, cabe resaltar que el trabajo realizado se implementó en una interfaz gráfica para mejor interacción con el usuario.

7.2. Sistema mecánico

En esta sección se construye un sistema mecánico que permite hacer la calibración de la cámara digital ver *Figura 11*. En primer lugar, la ubicación de la cámara digital se establece en el centro de todo el sistema haciendo que el enfoque y la captura sean el adecuado, de la misma manera, se utiliza una lámpara plana led ubicada en frente de la cámara digital, esta ubicación de la lámpara led se realiza de modo que ilumine la escena para obtener un contraste alto en las imágenes siendo más representativo para el proceso de segmentación, por otra parte, en la sección 6.1. se muestra cómo se realiza la calibración de la cámara digital; de este modo, se generan dos movimientos esenciales, movimiento horizontal y movimiento angular, realizándoles un control desde la tarjeta de Arduino uno.



Figura 11 Sistema mecánico.

7.2.1. Movimiento angular

El movimiento angular, ver *Figura 12*, consistió en posicionar el tablero de damas en ángulos diferentes para generar planos heterogéneos en las capturas de la cámara digital, los que rápidamente se guardan por el algoritmo de calibración (sección 7.3), seguidamente, terminados los movimiento angulares se procede a mover horizontalmente la plataforma a fin de despejar el área donde se capturan las imagen de la hoja de plátano.



Figura 12 Movimientos angulares del tablero de damas.

El movimiento angular es realizado mediante dos servomotores de referencias SG90 ver *Figura 13*, permiten girar de 0-180 grados, se superpone uno encima del otro, cada uno realizando un movimiento en diferente dirección, por tanto, haciendo que el patrón de ajedrez genere espacios representativos para la calibración.



Figura 13 Servomotores del tablero de damas.

7.2.2. Movimiento horizontal

El movimiento horizontal, ver *Figura 14*, permitió que en cualquier instante que se desee calibrar la cámara el tablero de damas se posicione perpendicularmente a la cámara digital y terminada la calibración se retire despejando el área de interés. El movimiento se realiza por medio de un sistema de correa dentada, la cual se encarga de mover la plataforma en la que está sujeta el tablero de damas, este sistema de correa dentada se conforma por un motor paso a paso anclado a un diseño de piñones y polea dentada, para razones de lo anterior, se incluyeron dos finales de carrera indicando que la plataforma estaba en el inicio y en el final, para tener un control absoluto de su puesta en marcha.

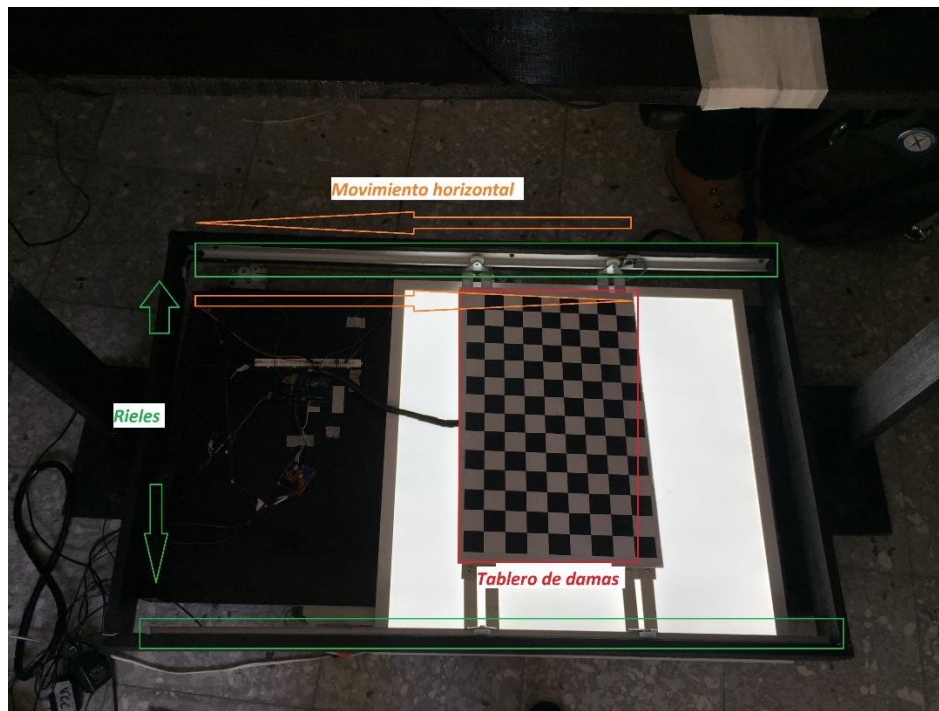


Figura 14 Movimiento horizontal del tablero de damas.

7.2.3. Control con Arduino uno

El control con Arduino uno, consistió en manejar, la comunicación serial, el control del motor paso a paso, la generación de PWM y la lectura de los sensores finales de carrera. Para la comunicación serial se utiliza el software de desarrollo Matlab en conjunto con Arduino [14], en igual forma, el microcontrolador se programó con el algoritmo mostrado en la *Figura 15*. La idea de controlar el motor paso a paso del sistema de la correa dentada es permitir el desplazamiento de la plataforma

sobre los rieles precisamente, puesto que la plataforma permanece sujeta a ella se es necesario tener un movimiento leve, al mismo tiempo, el inicio y el fin del desplazamiento son indicados por los sensores de fin de carrera.

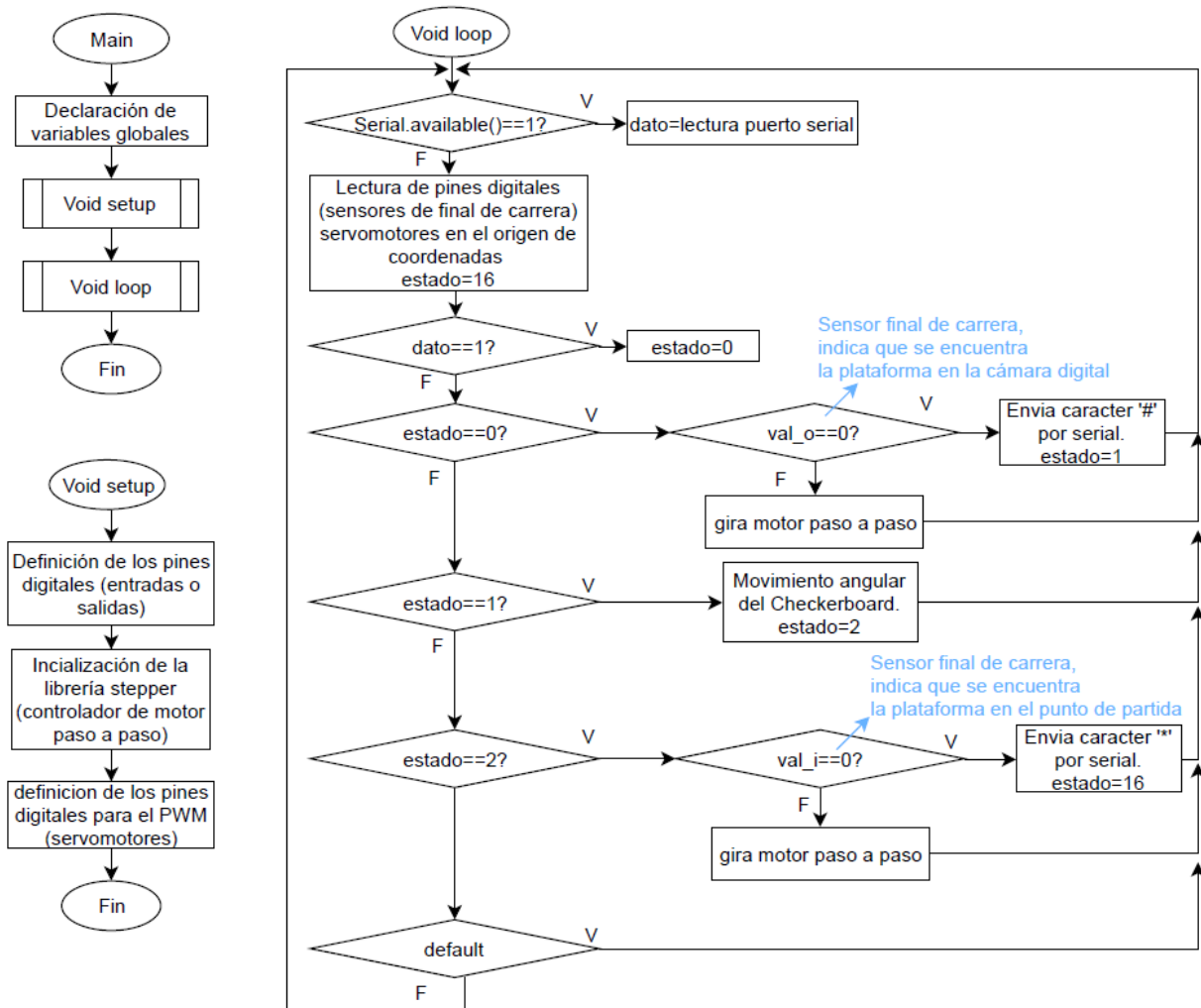


Figura 15 Algoritmo implementado en el microcontrolador de Arduino uno.

7.3. Calibración de la cámara digital.

En esta sección se desarrolla la calibración de la cámara digital por medio de la aplicación camera calibrator del entorno de desarrollo Matlab, lo que permite obtener los parámetros de la cámara, por otro lugar, se encuentra el área en centímetros de los cuadros negros del tablero de damas con la ayuda de los parámetros de la cámara, definiendo esta como un área conocida.

7.3.1. Algoritmo calibración de la cámara digital

El método de calibración de Zhang, explicado en la sección 6.1, abarca la estimación de los parámetros geométricos de la cámara, de donde se extrae la matriz intrínseca y la matriz rotacional, en el caso de la matriz rotacional, se tienen n matrices rotacionales debido que hay n planos, sin embargo, se coge el plano n más perpendicular con respecto a la cámara digital, mencionadas matrices permiten extrapolar las medidas geométricas de las escenas de la cámara, para el caso, la extrapolación de un pixel a centímetros.

En esta ocasión la calibración de la cámara digital se implementa con la aplicación de Matlab camera calibrator, La aplicación le permite estimar los parámetros intrínsecos, extrínsecos y de distorsión de la lente de la cámara. Esta aplicación incluye la eliminación de los efectos de la distorsión de la lente de una imagen, la medición de objetos planos, entre otros.

En la *Figura 16*, se observa el algoritmo de la calibración de la cámara llevada a cabo en el entorno de desarrollo Matlab, de este modo, el algoritmo pretende obtener los parámetros geométricos de la cámara digital. La calibración se obtiene con el patrón de ajedrez o tablero de damas, puesto que este, se posiciona en diferentes ángulos para formar perspectivas de imágenes a fin de traslapar estos puntos del tablero de damas en las proyecciones de la aplicación de camera calibrator.

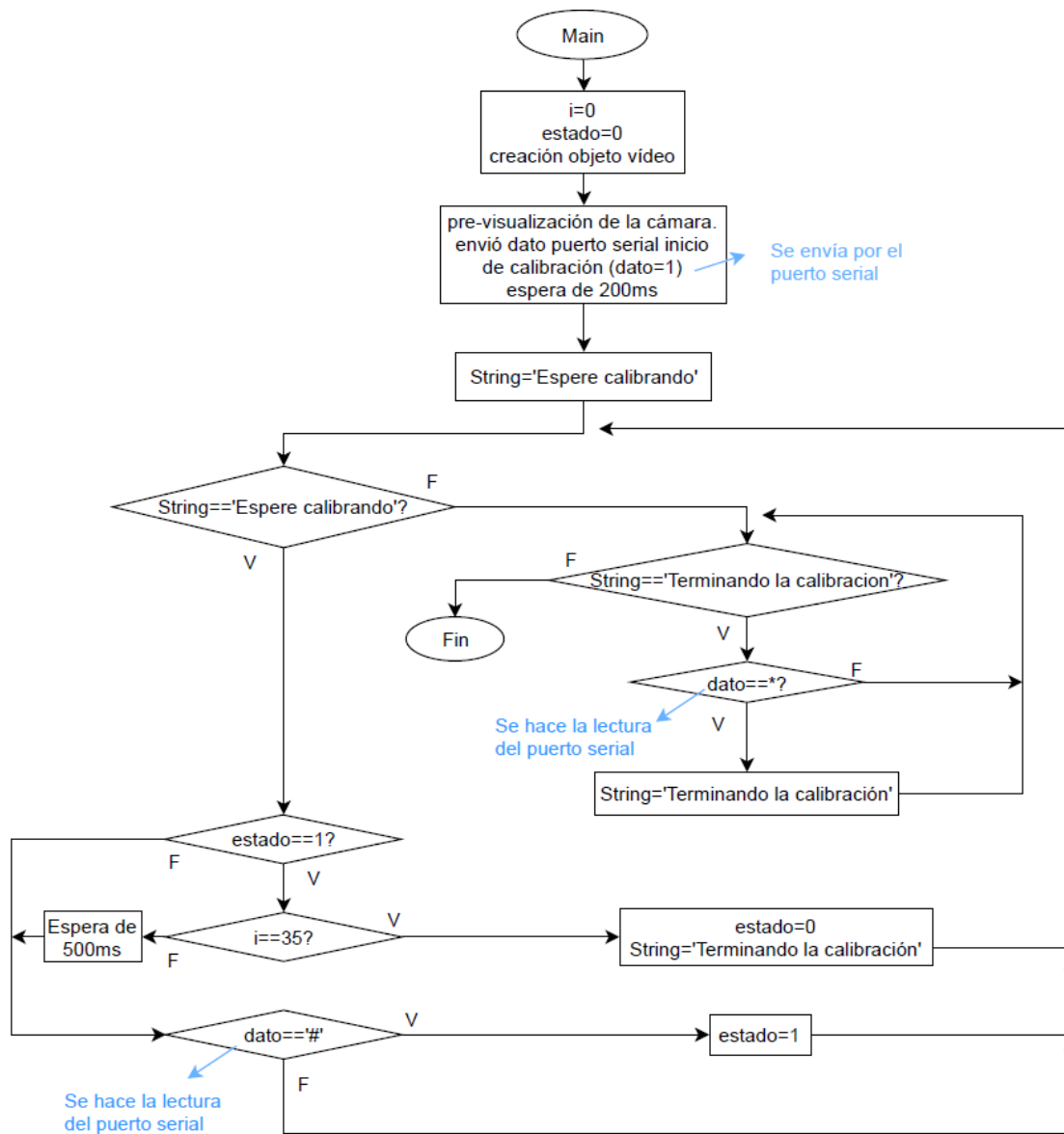


Figura 16 Algoritmo de la calibración de la cámara digital.

7.3.2. Algoritmo del cálculo del área conocida

El área foliar de la hoja de plátano se calcula por medio de la matriz de transformación, esta matriz es equivalente a la multiplicación matricial entre la matriz intrínseca y la matriz rotacional de los parámetros de la cámara entregados por la aplicación camera calibrator. Por medio de una solución de mínimos cuadrados se mitiga el error de medición del área foliar, puesto que la aproximación de la matriz de transformación en este caso presenta una distorsión radial, por ende, se pone en marcha la toma de diferentes coordenadas de la imagen del patrón de ajedrez (tablero de damas)

sabiendo que cada cuadro negro es de 9 cm^2 de área, seguidamente estas áreas tomadas de diferentes cuadros se traslapan en una función polinomial de la forma $ax^2 + bx + c$, donde a , b y c son los coeficientes de cambio, de este modo se garantizan la solución a la ecuación polinomial. En la Figura 17, se puede observar el algoritmo del área conocida.

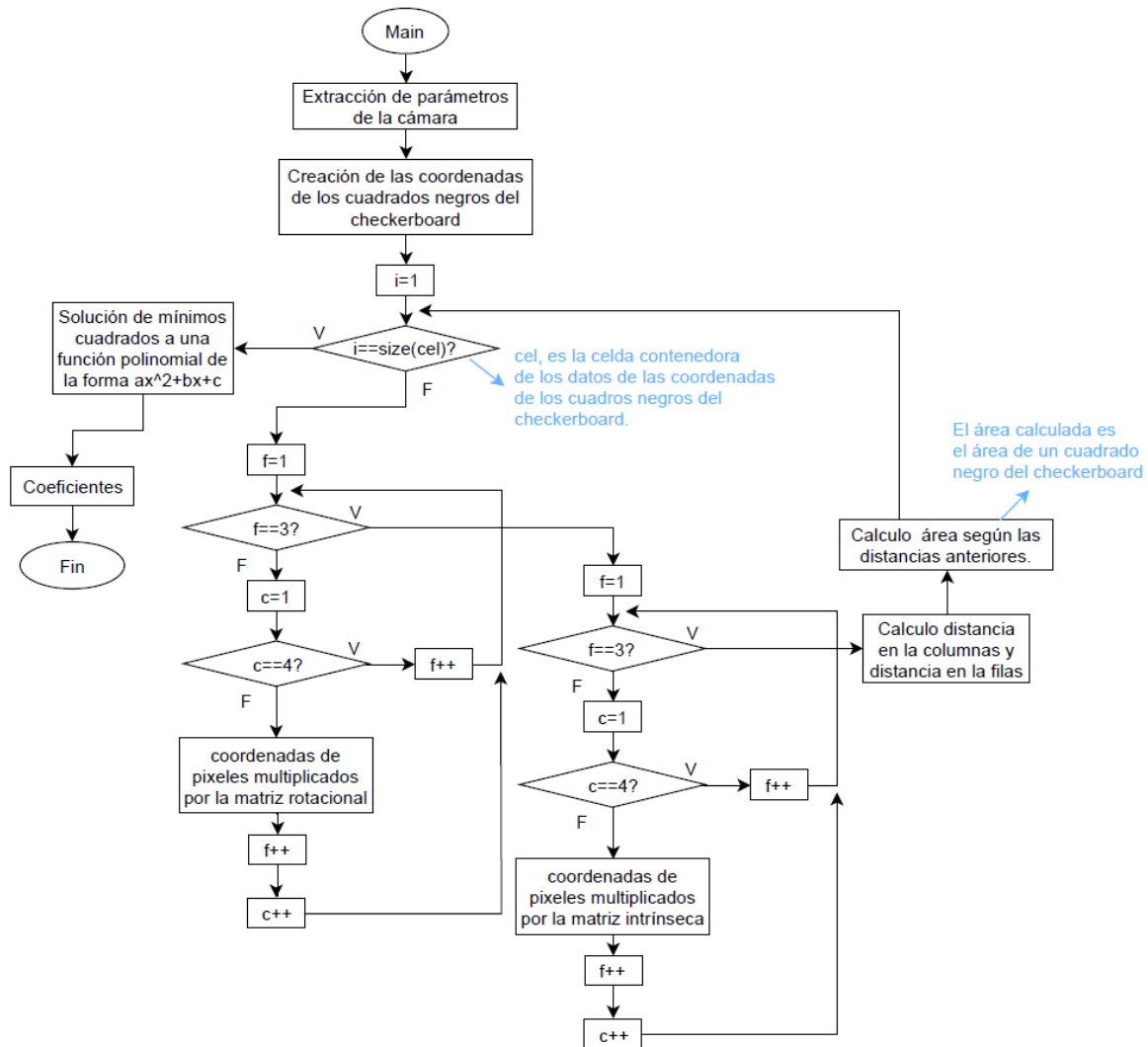


Figura 17 Algoritmo del cálculo del área conocida.

7.4. Algoritmo de segmentación.

En esta sección de segmentación se emplea la segmentación del área foliar, que se basa en implementar técnicas de procesamiento de imágenes, llevado a cabo una segmentación muy exacta del área foliar, puesto que, es la métrica que nos entregará la precisión en la medición del área foliar con respecto a otros métodos entonces se tiene alta rigurosidad con la segmentación y, por

otro lugar, se hace la segmentación adaptativa que pretendió implementar un análisis de áreas presentes en la hoja, entiéndase como la segmentación de una área de interés sobre la hoja del plátano.

7.4.1. Segmentación área foliar.

Consistió en llevar a cabo técnicas de procesamiento de imágenes, en primer lugar, se realiza un análisis de histograma, a fin de distribuir las frecuencias más representativas de la imagen de la hoja de plátano, seguidamente se realiza una corrección gamma, permitiendo aumentar el contraste en fronteras que poseen una correlación alta de intensidades, pudiéndose ver diferencias de intensidades de color mucho más que antes de la corrección gamma, en siguiente lugar, se umbralizó la imagen de modo que permita segmentar una sección de interés de la imagen, entonces, se aplica las operaciones morfológicas, permitiendo dilatar o erosionar las imágenes binarias. Una vez obtenida el área foliar, quiere decir que se tiene una misma imagen binaria de esa área, es entonces más sencillo de seguir una segmentación de área enferma, puesto que se aplica el método de umbralización en solo el área segmentada previamente. En el mismo orden de ideas, se aplica la agremiación de grupos por el método de conjuntos conectados explicado en la sección 22, seleccionando el grupo de interés, por otra parte, se lleva a cabo un análisis general que permitió segmentar el área foliar para n imágenes con el mismo algoritmo, ver *Figura 18* donde se muestra el algoritmo implementado en Matlab y, en la *Figura 19*, donde se observa la medición del área foliar en la interfaz gráfica.

En la segmentación final se extrae el número de píxeles del área foliar, los cuales indican la medición en píxeles del área foliar, con lo que se implementa la ecuación (15), a fin de obtener mencionada área en centímetros.

Esta conversión se realiza con una regla de tres, partiendo de que $9cm^2$ son 47 píxeles de alto por 47 píxeles de ancho, es decir, 2209 área píxeles.

$$Area\ Foliar = \frac{longitud_píxeles}{2209} * Area_conocida \quad (15)$$

Donde:

Longitud_pixeles: es la longitud de los pixeles blancos en la imagen binaria, puesto que estos son los pixeles de interés que acarrean una segmentación previa del área foliar.

Área_conocida: es el área otorgada por el algoritmo de cálculo del área conocida ver *Figura 17*.

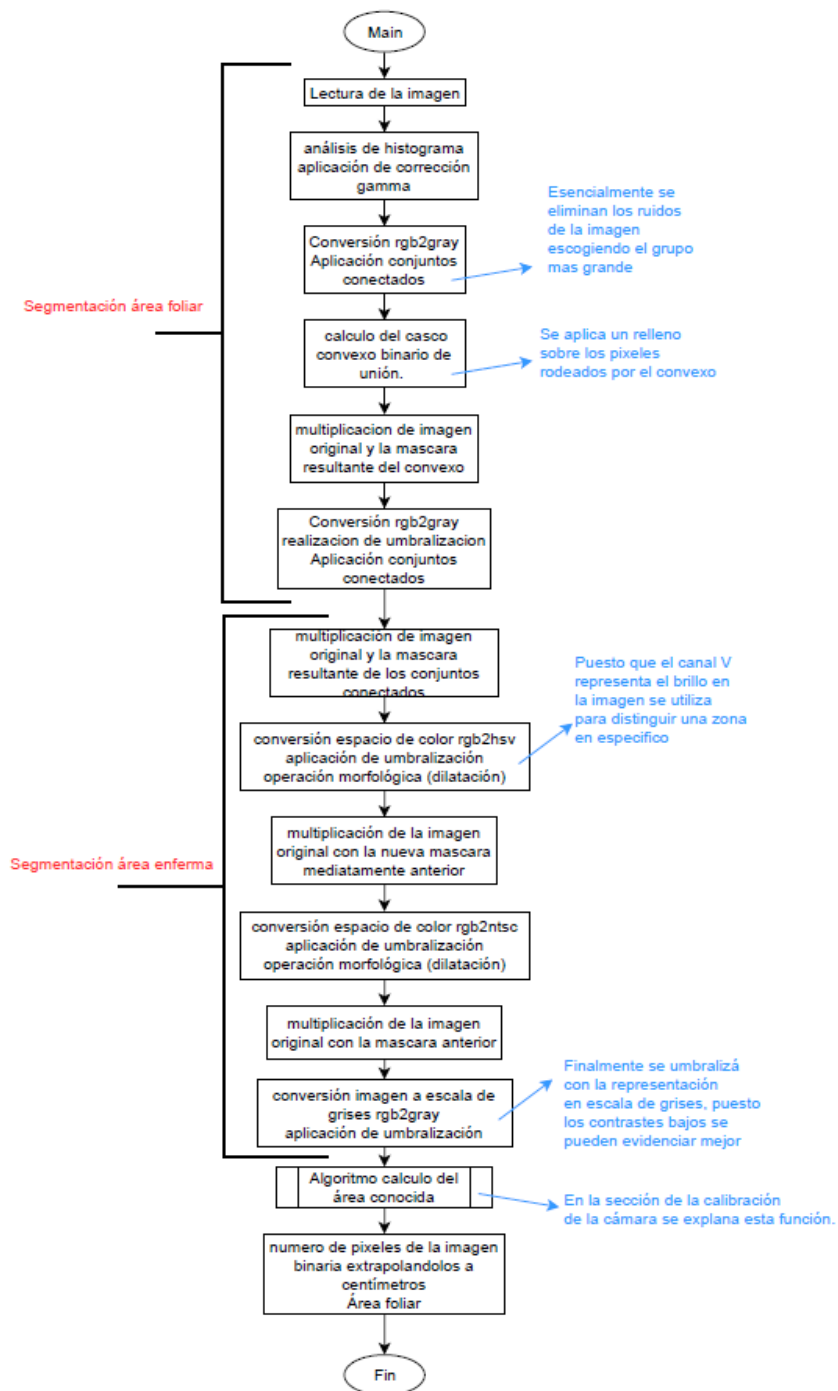


Figura 18 Algoritmo de segmentación del área foliar.

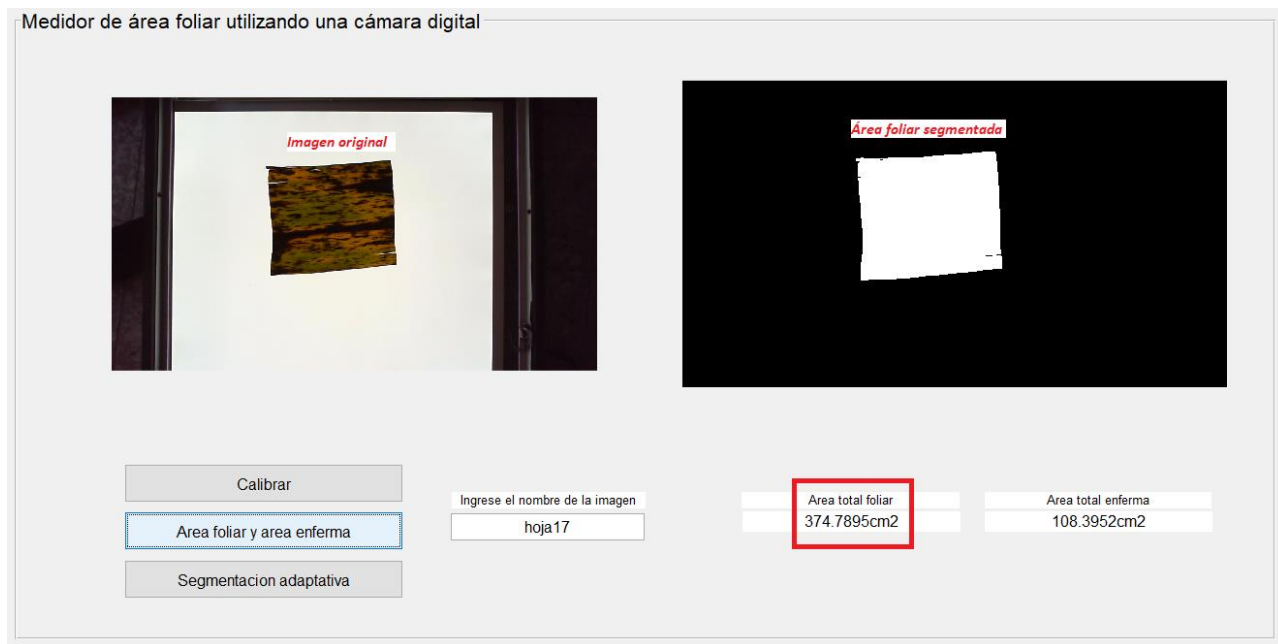


Figura 19 Medición de área foliar en la interfaz gráfica.

7.4.2. Segmentación adaptativa

Consistió en segmentar un área deseada sobre la hoja de plátano, podemos encontrar grupos representativo como lo son el área sana, el área de la sigatoka amarilla y el área de la sigatoka negra, entiéndase área sana como el color verde presente en la hoja, en cambio el área de la sigatoka amarillo como el color amarillo y por último el área de la sigatoka negra como el color café. Se pone en marcha el concepto analizado en la sección 6.9, en el que se hace uso del método de entrenamiento no supervisado k-Means, para hacer una clasificación de un conjunto de grupos permitiendo ordenar los datos de manera correlacional, por una parte ocurre una adaptabilidad precisa, desde el punto de vista de segmentación que otorga un enmascaramiento representativo de cada sección de color de la hoja de plátano. En la *Figura 20*, se puede observar el algoritmo implementado para la segmentación adaptativa y, en la *Figura 21*, se observa la segmentación del área seleccionada de la imagen de la hoja de plátano.

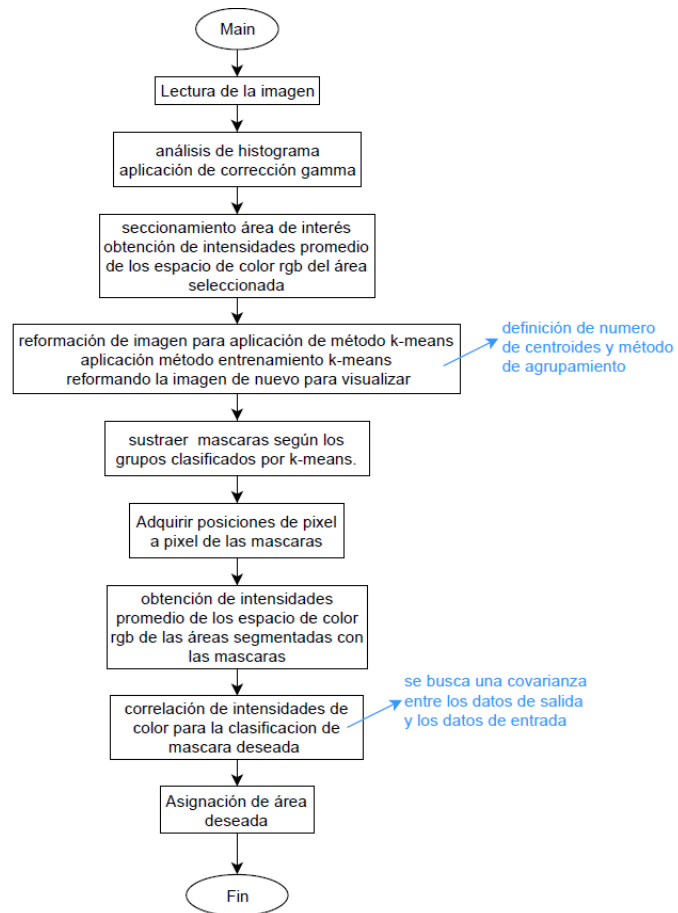


Figura 20 Algoritmo de segmentación adaptativa.

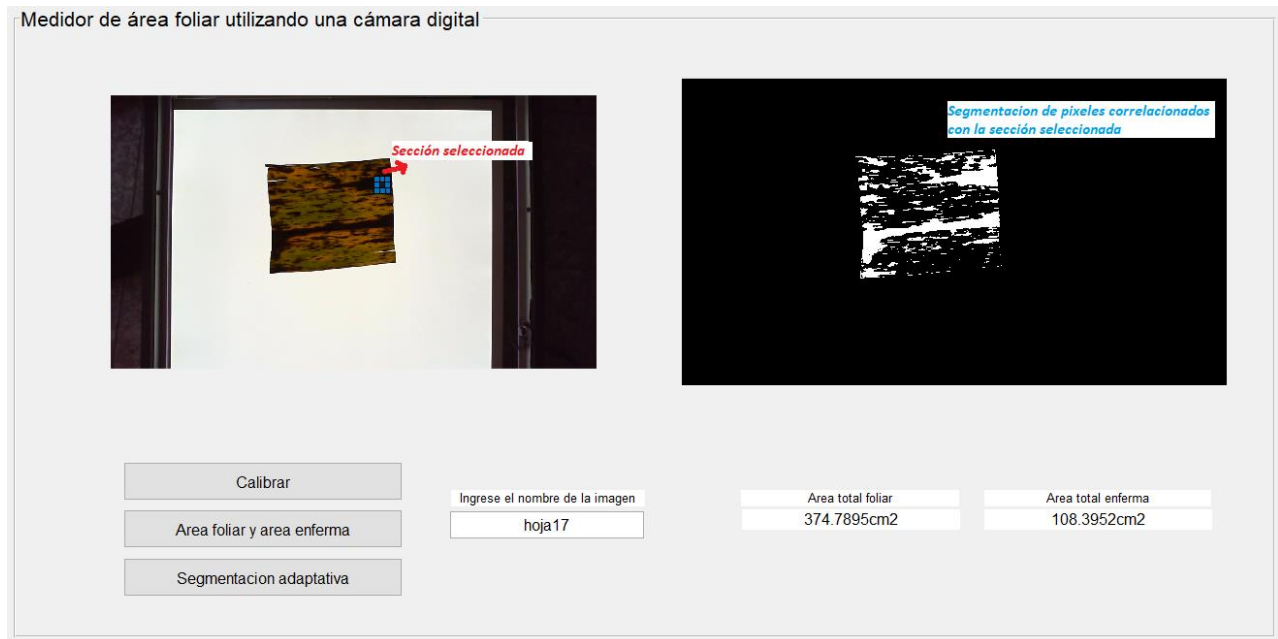


Figura 21 Segmentación seleccionada de la hoja de plátano.

7.5. Validación

En esta sección se procede a verificar y precisar la medición que se adquiere por medio del medidor de área foliar, entonces para la mencionada validación se hace una comparación entre el método medición conteo de cuadrículas y la medición del medidor de área foliar desarrollado, esta comparación es de alta precisión y sirve para corroborar las mediciones, en el capítulo 8 se rebosa con más detalle el procedimiento.

8. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del medidor, se realiza primero la medición del área foliar de diez hojas de plátano empleando el método de conteo de cuadrícula, utilizando para esto hojas de papel milimetrado sobre las cuales se dibuja la silueta de cada una de las hojas de plátano. El procedimiento descrito puede observarse en las *Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25 y Figura 26*.

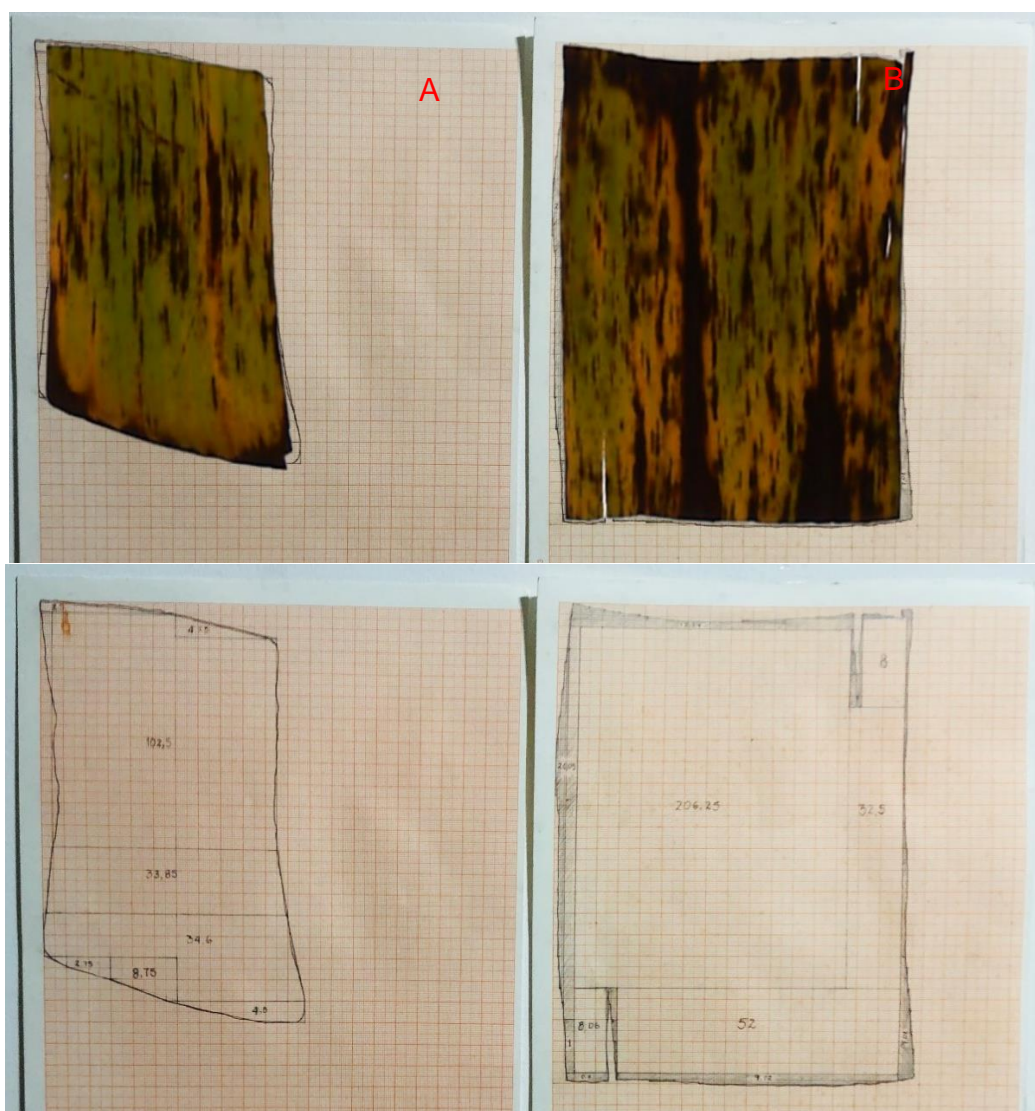


Figura 22 Mediciones método conteo por cuadrículas de A y B

Posteriormente, se obtiene que el área foliar de las hojas. 359.56 cm^2 (B) y 194 cm^2 (A).

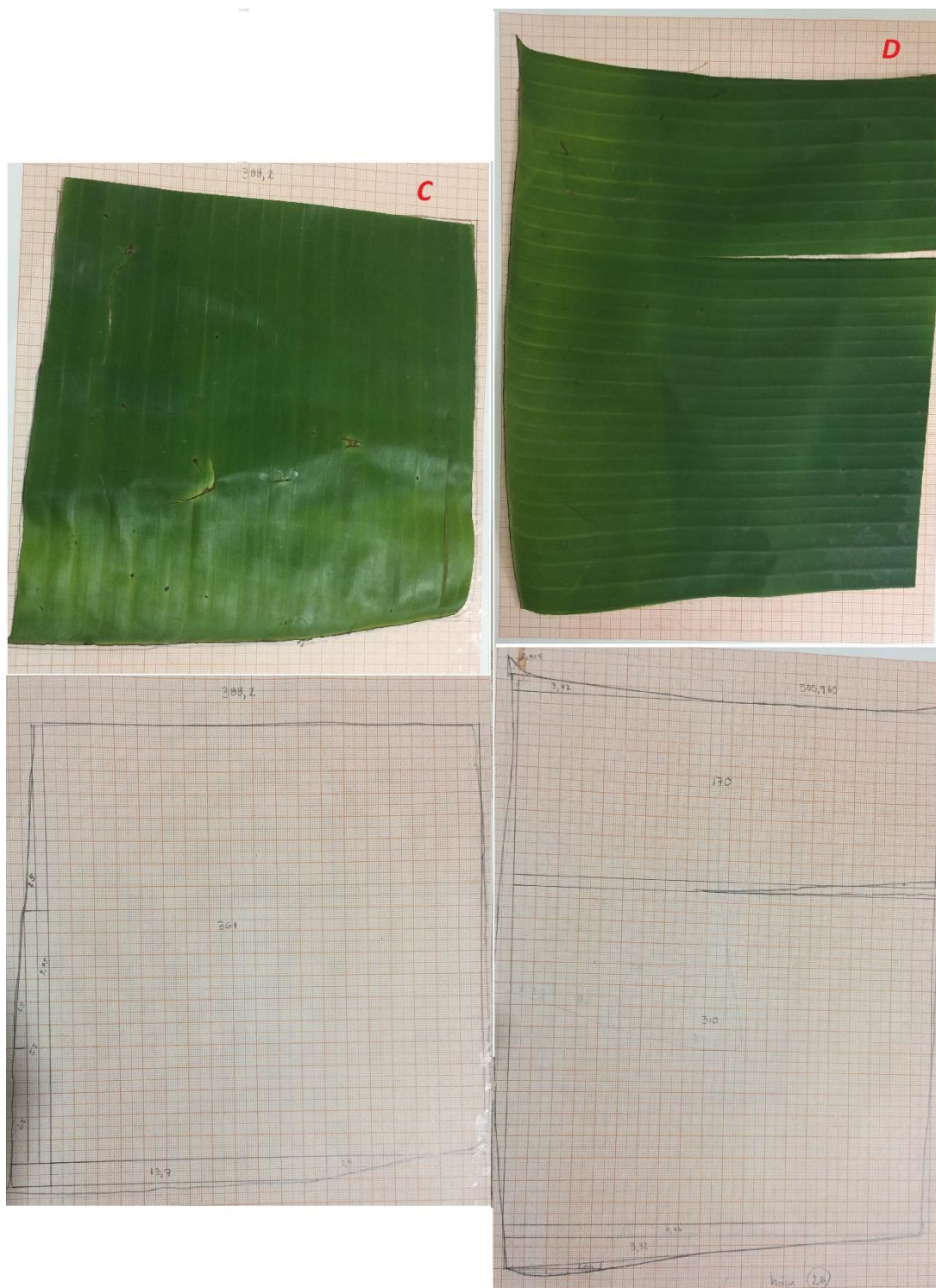


Figura 23 Mediciones método conteo por cuadrículas de C y D

De la misma manera, el área foliar de las hojas es 505.9 cm^2 (D) y 388.2 cm^2 (C).

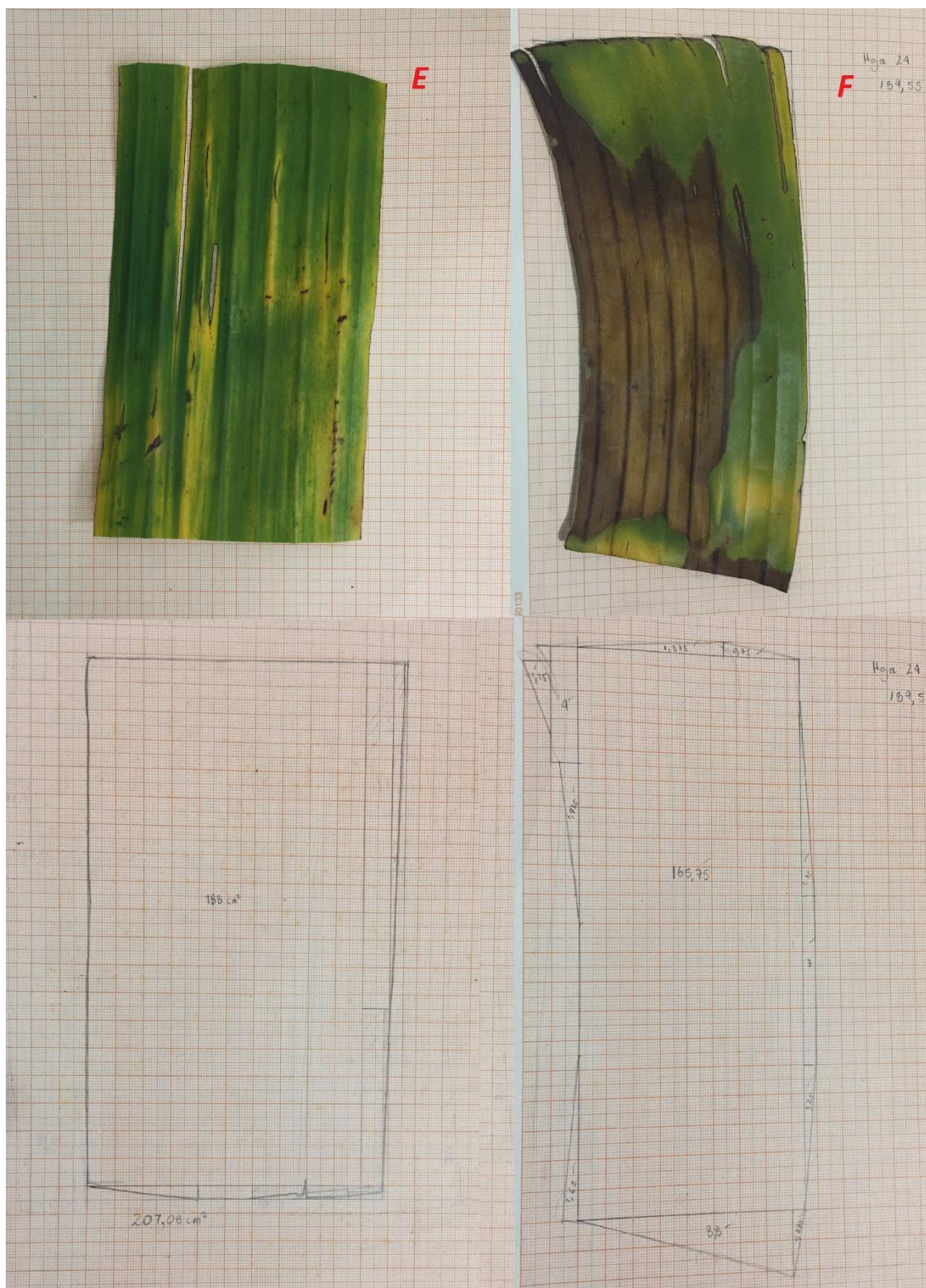


Figura 24 Mediciones método conteo por cuadrículas de E y F

El área foliar de las hojas es 189.5 cm^2 (F) y $207,8 \text{ cm}^2$ (E).

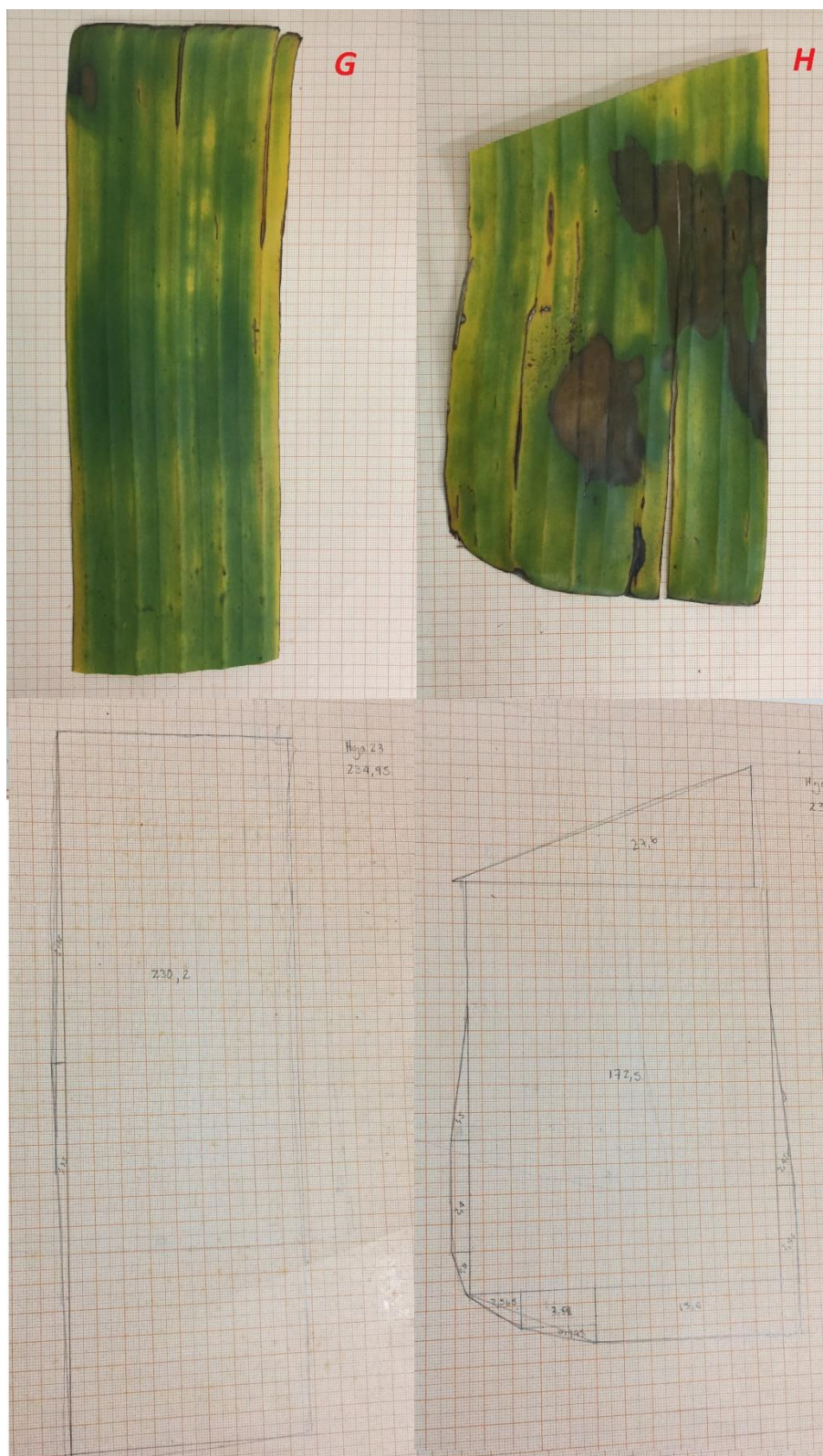


Figura 25 Mediciones método conteo por cuadrículas de G y H

Seguidamente, el área foliar de las hojas es 230.3 cm^2 (H) y 234.9 cm^2 (G).



Figura 26 Mediciones método conteo por cuadrículas de I y J

De último, el área foliar de las hojas es 286.2 cm^2 (J) y 381.2 cm^2 (I).

Para facilitar el análisis de las hojas de manera manual se realizó el proceso seleccionando hojas rectangulares con ciertas irregularidades, en segundo lugar, se procede a la medición utilizando el sistema desarrollado.

Primero se ejecuta el algoritmo y se lleva a cabo el proceso de calibración de la cámara, el cual sólo se realiza una vez, o cada vez que la cámara digital es cambiada de posición. Este proceso requiere de aproximadamente 2 minutos para su realización.

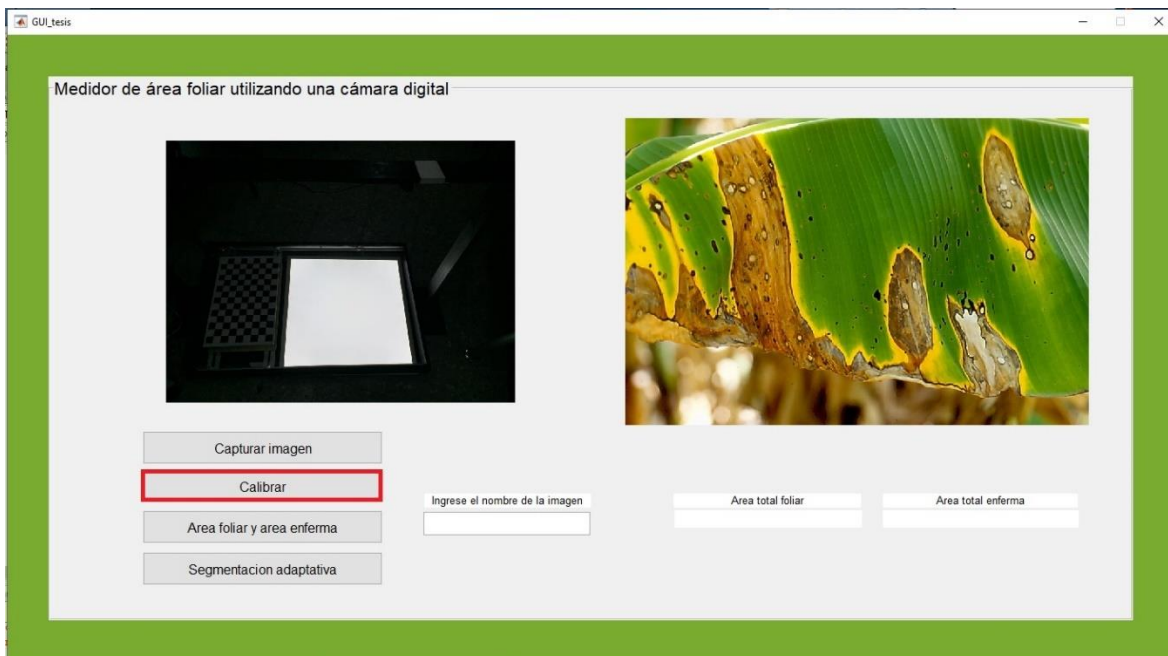


Figura 27 Proceso de calibración de la cámara digital.

Con la cámara calibrada, el siguiente paso es pulsar el botón de “*Capturar imagen*”, entonces se obtendrá la imagen de la hoja de plátano ubicada sobre la lámpara plana led. Se procede a realizar el cálculo del área foliar, para lo cual solo es necesario seleccionar la opción “*Área foliar y área enferma*” de la interfaz gráfica de usuario.

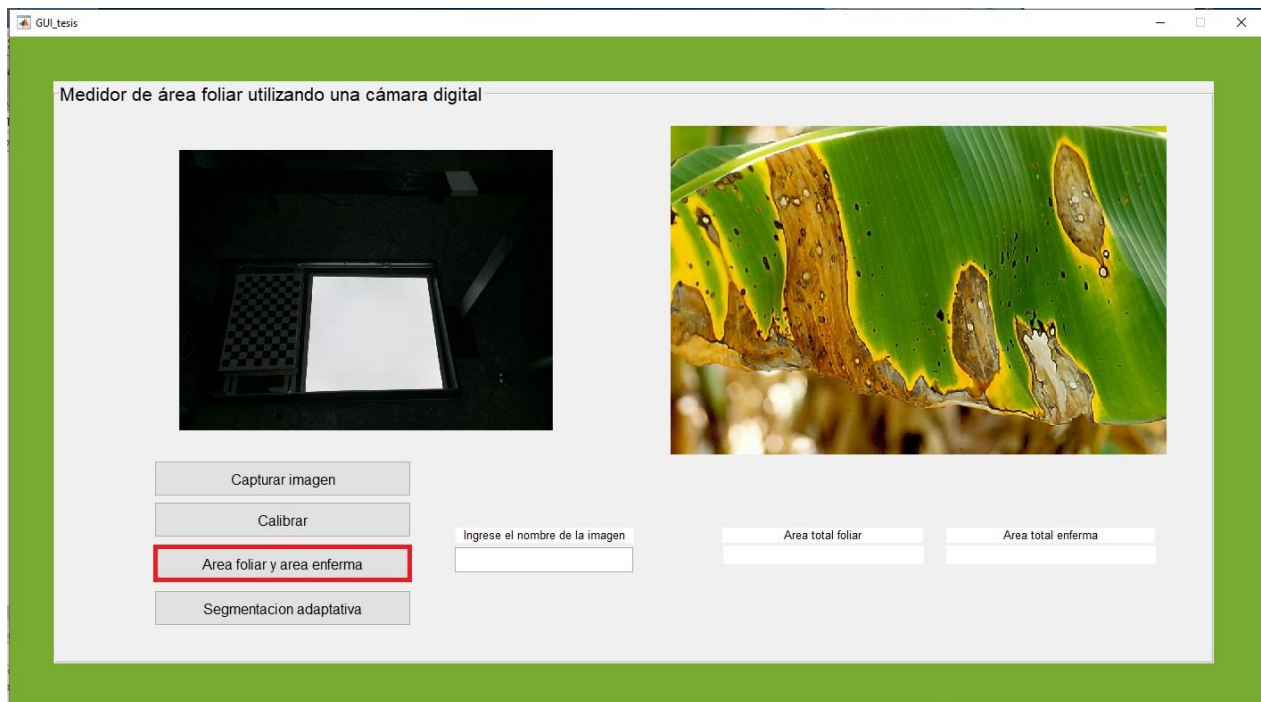


Figura 28 Proceso de cálculo de área foliar.

Como puede observarse en las *Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37 y Figura 38*, se realiza el proceso de medición para cada una de las hojas mediante el medidor desarrollado.

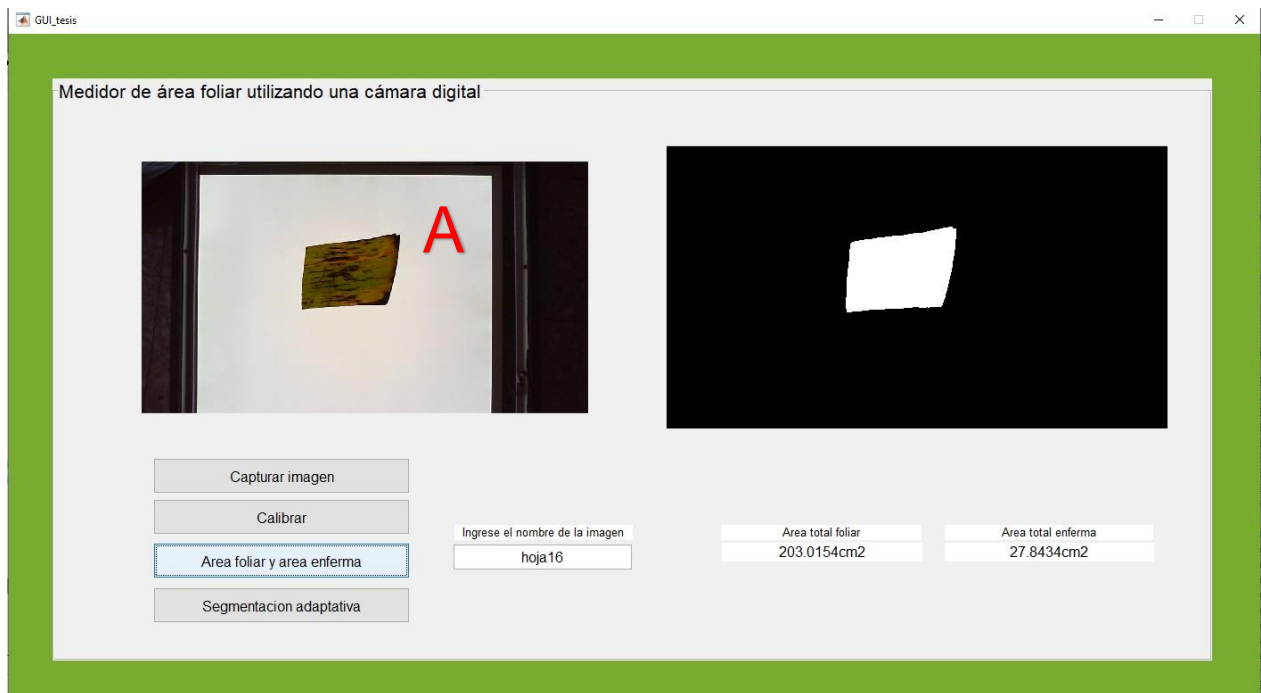


Figura 29 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja A.

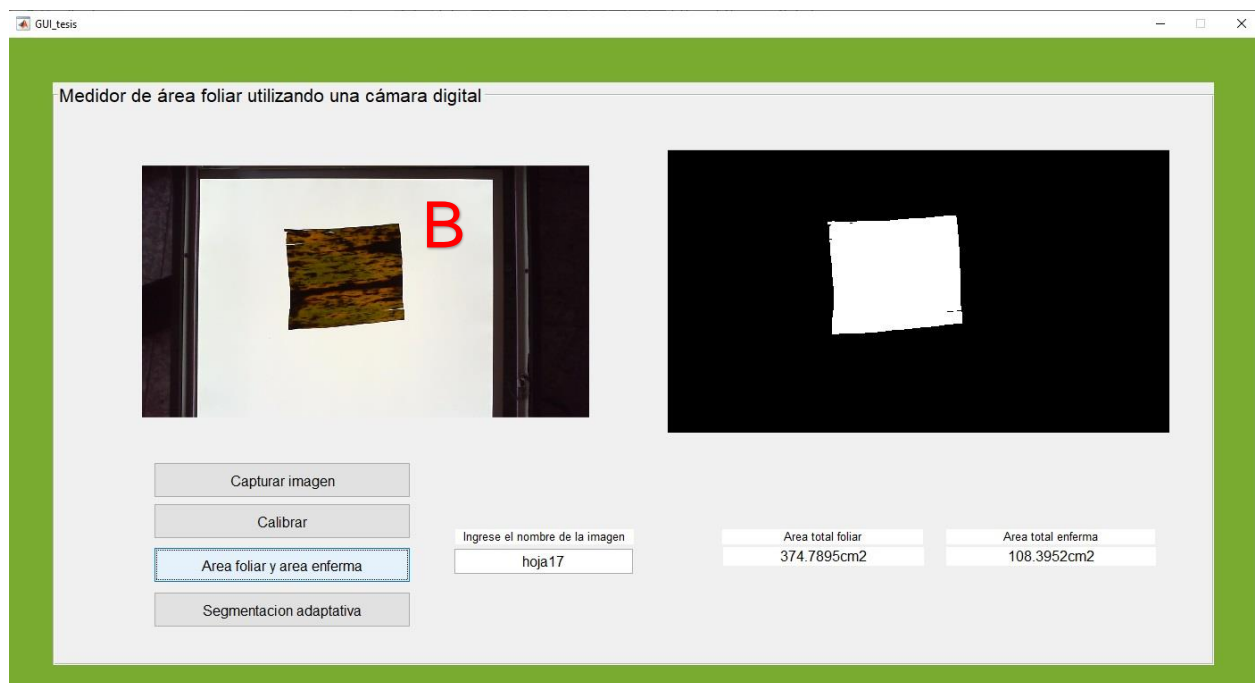


Figura 30 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja B.

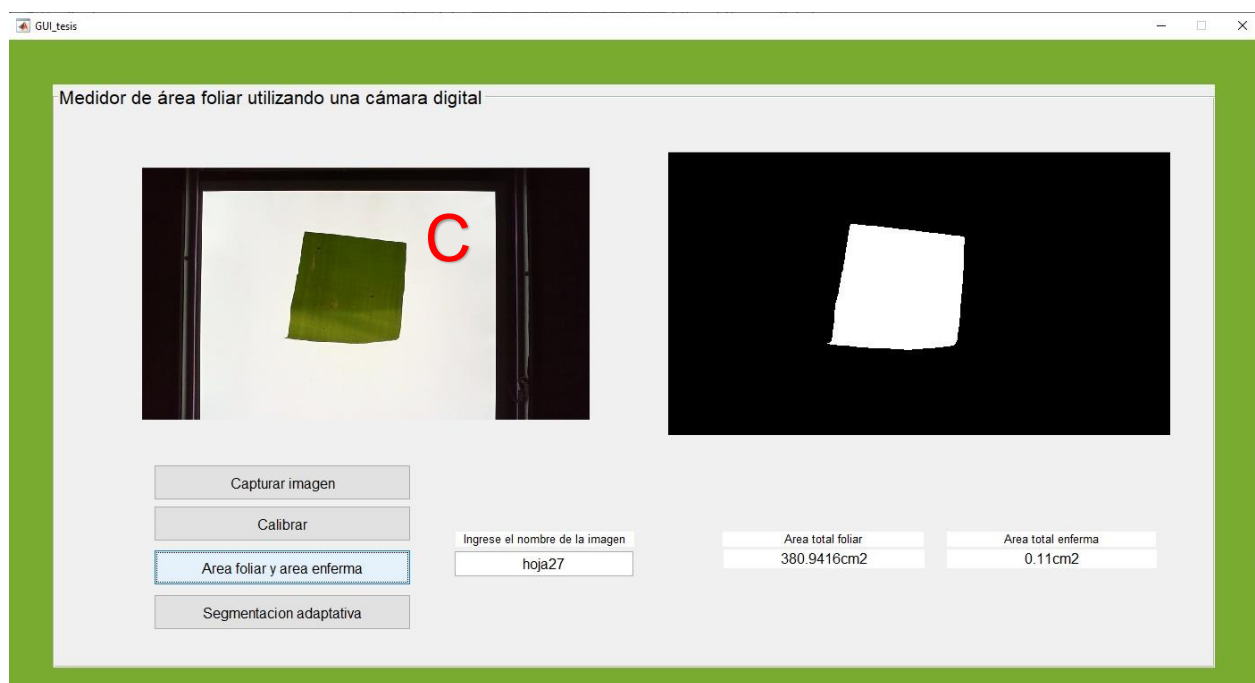


Figura 31 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja C.

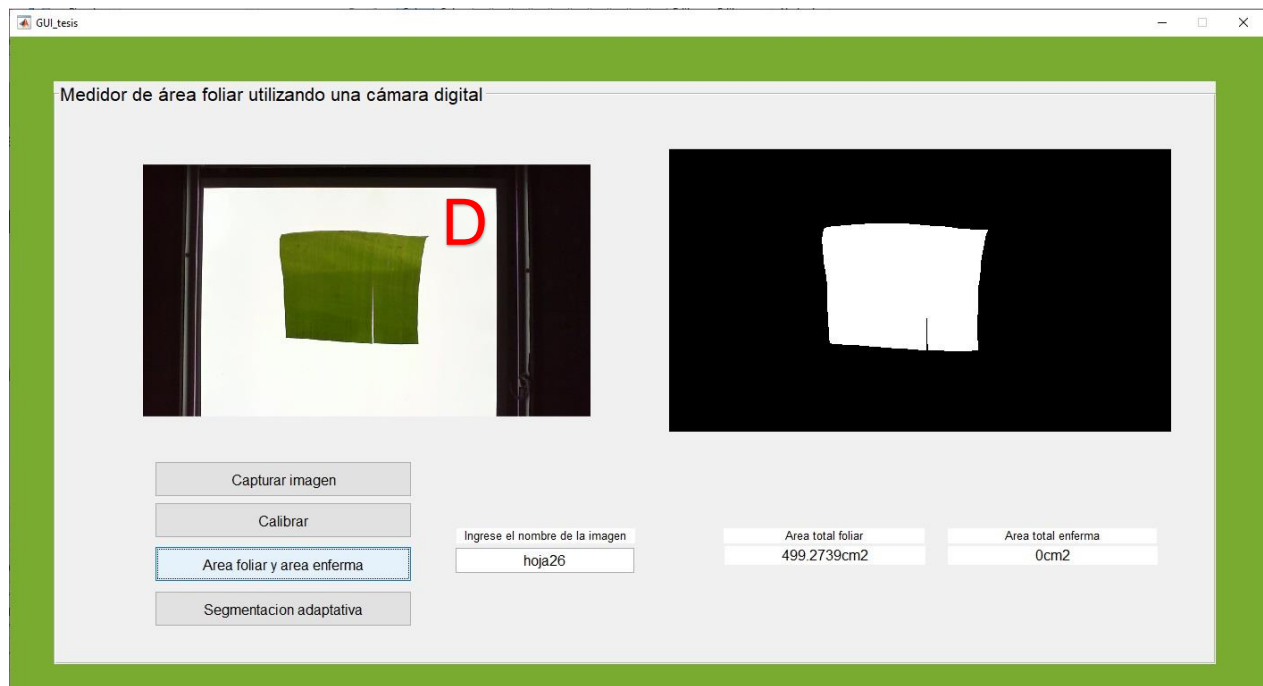


Figura 32 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja D.

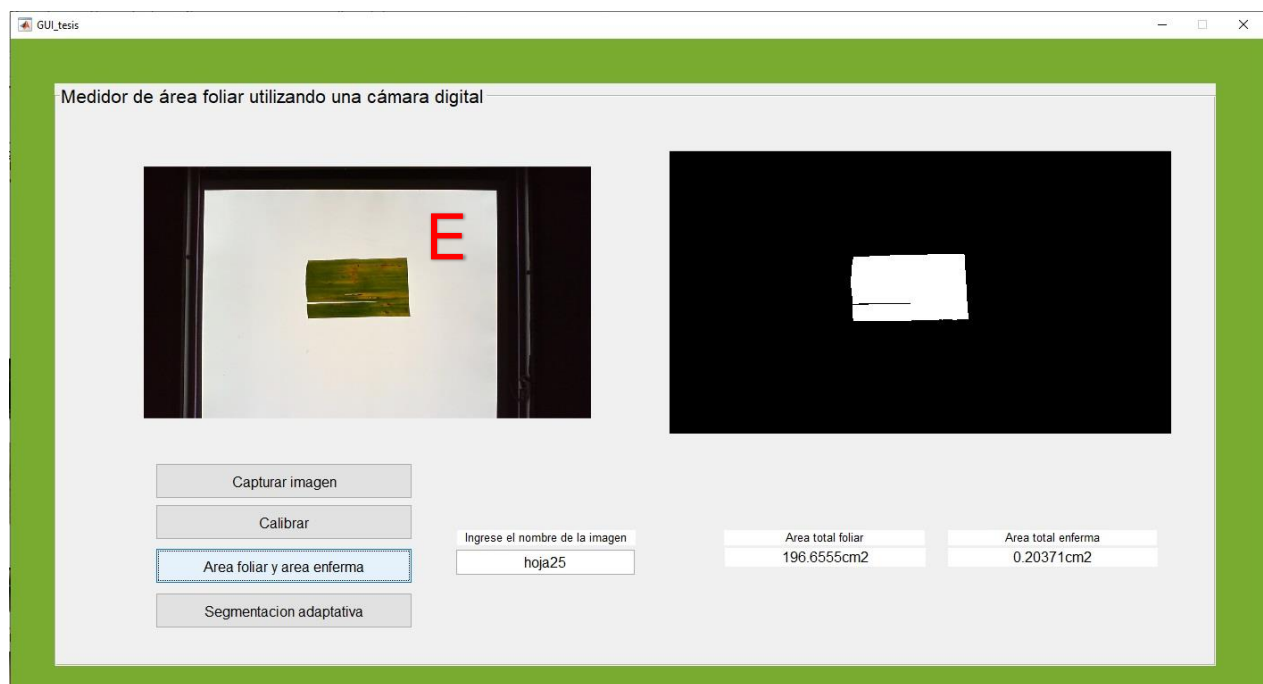


Figura 33 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja E.

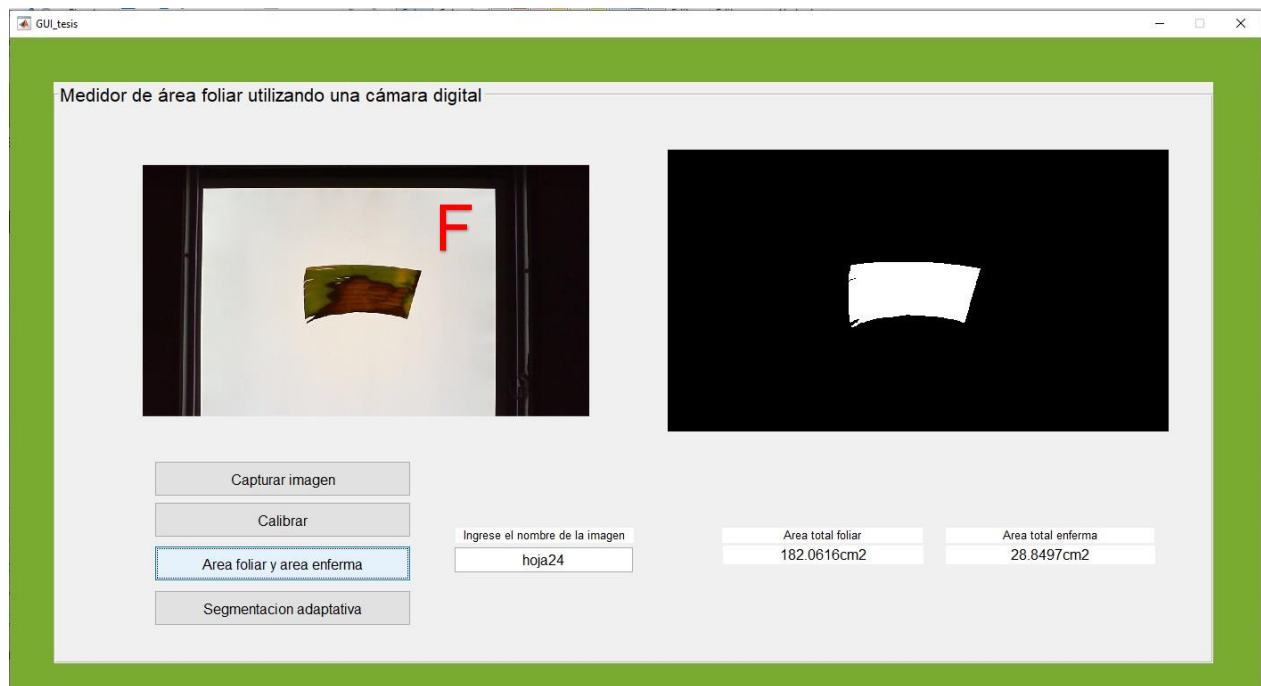


Figura 34 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja F.

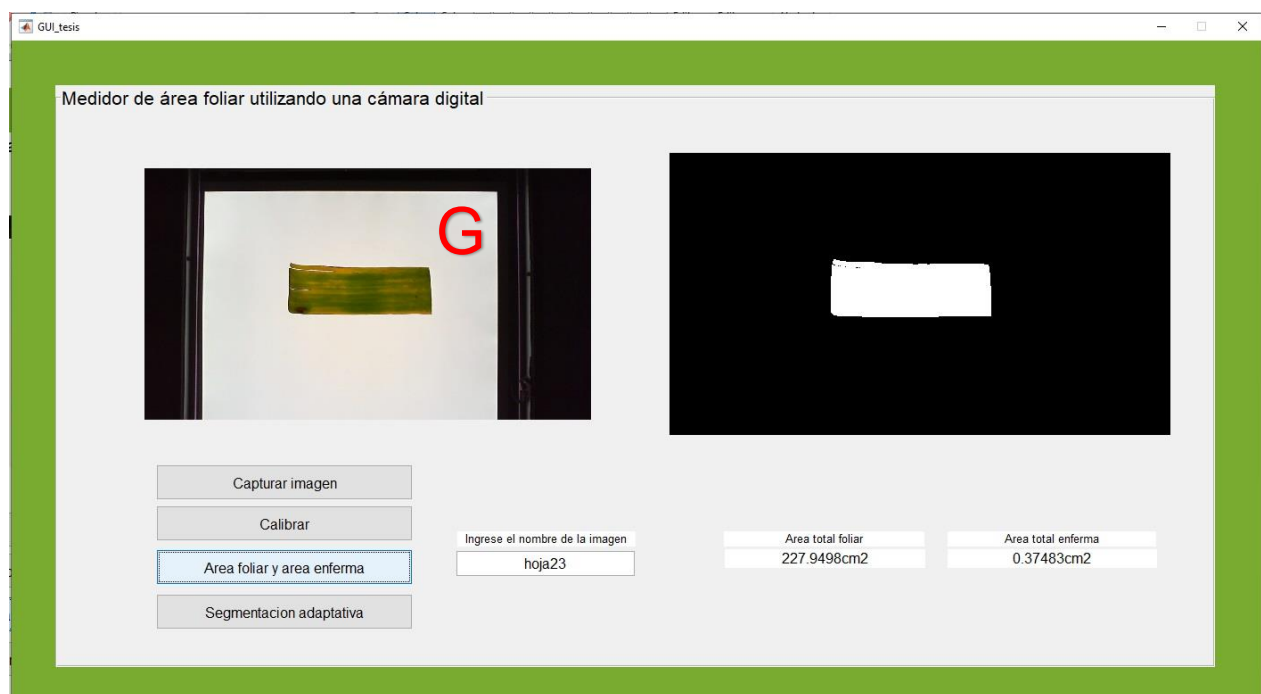


Figura 35 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja G.

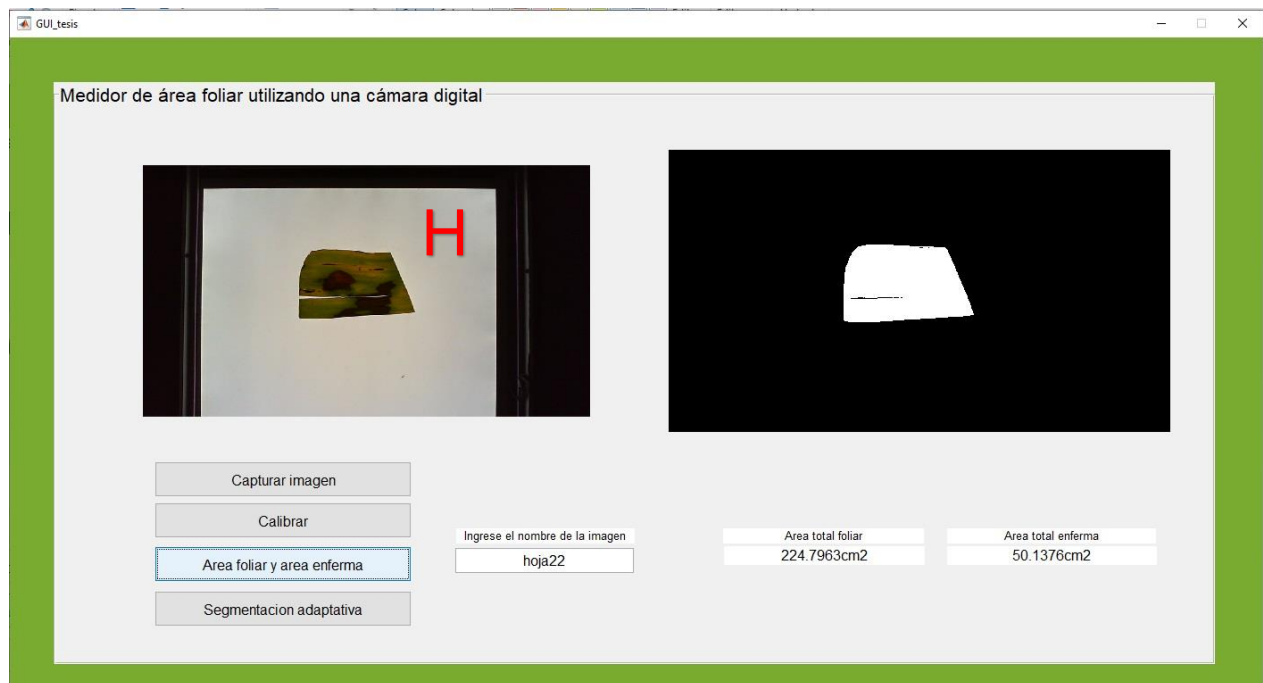


Figura 36 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja H.

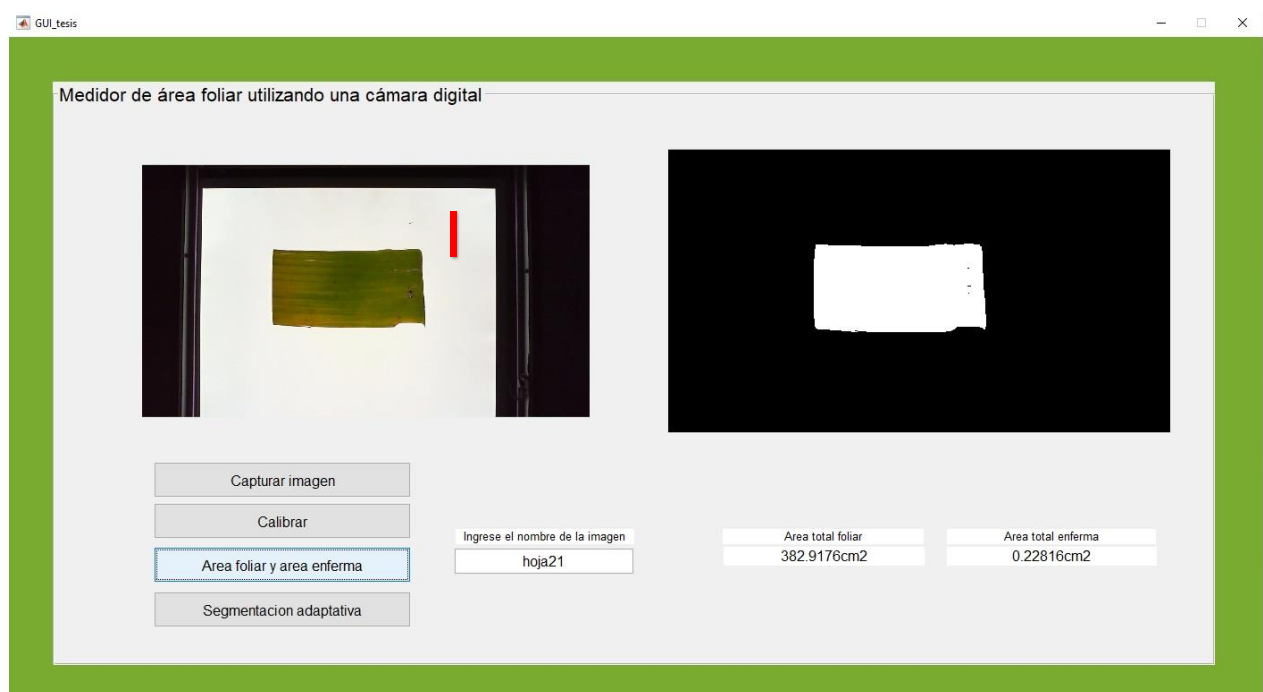


Figura 37 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja I.

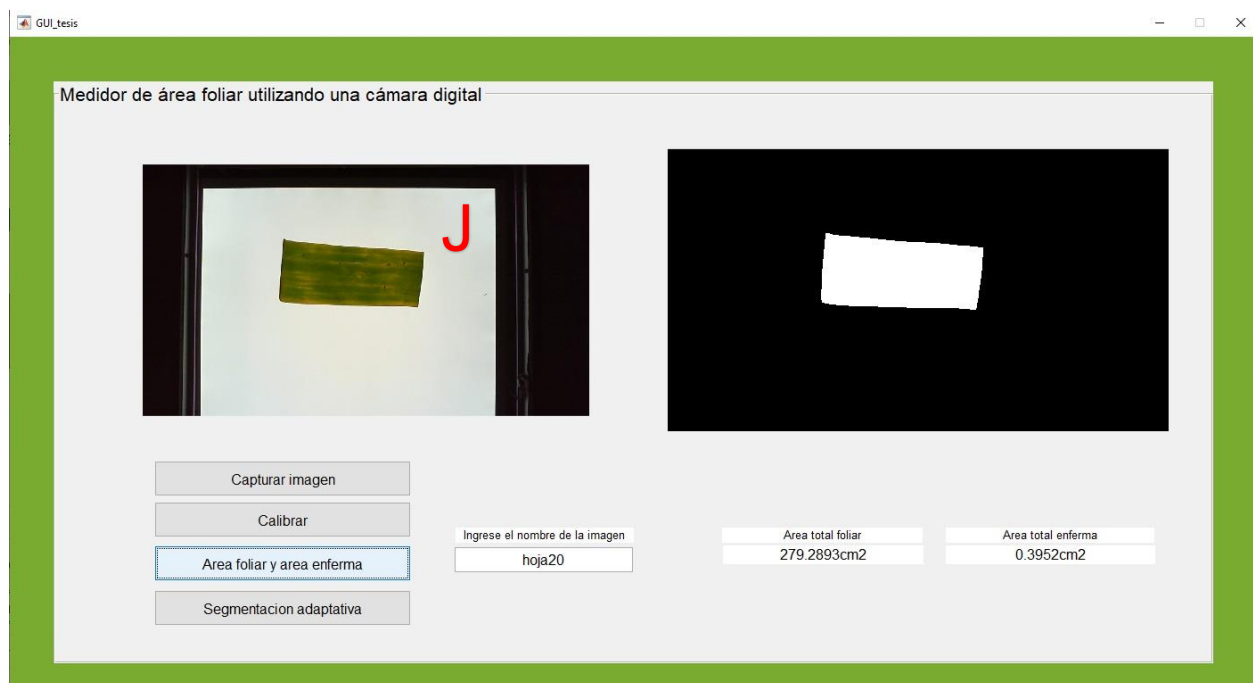


Figura 38 Proceso de cálculo de área foliar para la hoja J.

Como puede observarse en las *Tabla 1*, la *Tabla 2*, la *Tabla 3*, la *Tabla 4*, la *Tabla 5*, la *Tabla 6*, la *Tabla 7*, la *Tabla 8*, la *Tabla 9* y la *Tabla 10*, se realiza el cálculo de error relativo porcentual en la medida del área foliar, tomando como valor real el obtenido con el método de conteo de cuadrícula, y como valor medido el obtenido con el sistema desarrollado.

HOJA A	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	194	203.0154
Error relativo (%)	4.44075	

Tabla 1 Resultados de área foliar para la hoja A

HOJA B	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	359.56	374.7895
Error relativo (%)	4.06348	

Tabla 2 Resultados de área foliar para la hoja B

HOJA C	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	388.2	380.9416
Error relativo (%)	1.90538	

Tabla 3 Resultados de área foliar para la hoja C

HOJA D	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	505.965	499.2739
Error relativo (%)	1.34017	

Tabla 4 Resultados de área foliar para la hoja D

HOJA E	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	207.08	196.6555
Error relativo (%)	5.30089	

Tabla 5 Resultados de área foliar para la hoja E

HOJA F	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	189.55	182.0616
Error relativo (%)	4.11311	

Tabla 6 Resultados de área foliar para la hoja F

HOJA G	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	234.95	227.9498
Error relativo (%)	3.07094	

Tabla 7 Resultados de área foliar para la hoja G

HOJA H	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	230.325	224.7963
Error relativo (%)	2.45943	

Tabla 8 Resultados de área foliar para la hoja H

HOJA I	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	381.27	382.9176
Error relativo (%)	0.43028	

Tabla 9 Resultados de área foliar para la hoja I

HOJA J	Método conteo de cuadrícula	Medidor basado en procesamiento de imágenes
Área Foliar (cm^2)	286.25	279.2893
Error relativo (%)	2.49229	

Tabla 10 Resultados de área foliar para la hoja J

Seguidamente a partir de los resultados, se calcula el error relativo promedio ver *Tabla 11*, el cual, pondera los valores obtenidos de cada error relativo entre el método de conteo de cuadrícula y el método del medidor desarrollado.

Error relativo promedio	2.96167±1.2
-------------------------	-------------

Tabla 11 Error del medidor desarrollado

Se puede concluir, el medidor de área foliar desarrollado tiene un error promedio de 2.96±1.2

En segundo lugar, se procede a realizar la segmentación adaptativa en la hoja de plátano. Primero se debe seleccionar en la interfaz el botón “*Segmentación adaptativa*” ver *Figura 39*. Segundo el usuario selecciona el área deseada a segmentar ver *Figura 40*. Y por último se presenta la segmentación correspondiente ver *Figura 41*, *Figura 42* y *Figura 43*.

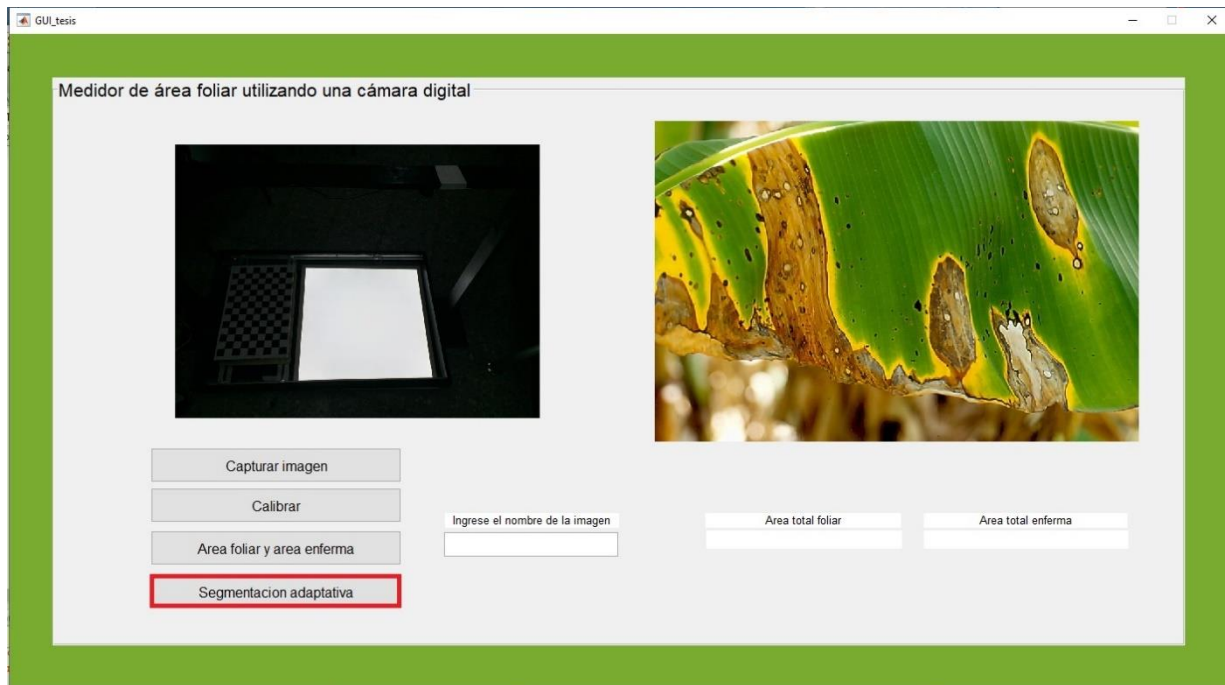


Figura 39 Proceso de segmentación adaptativa

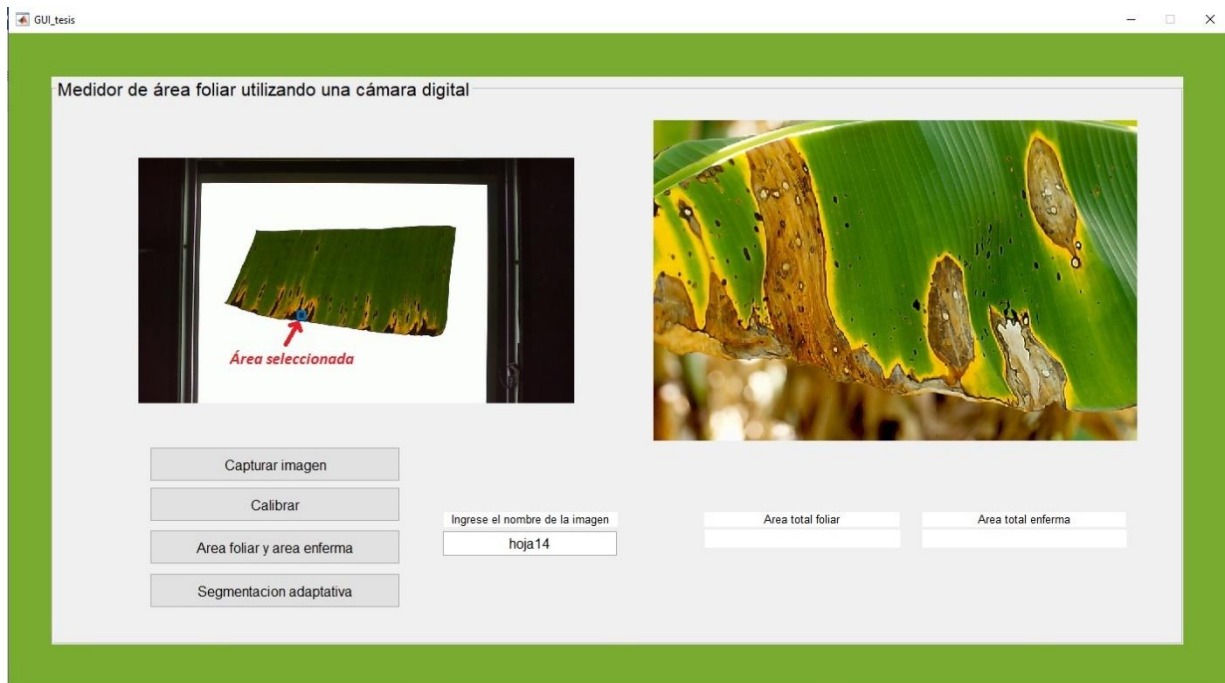


Figura 40 Área seleccionada en la segmentación adaptativa.

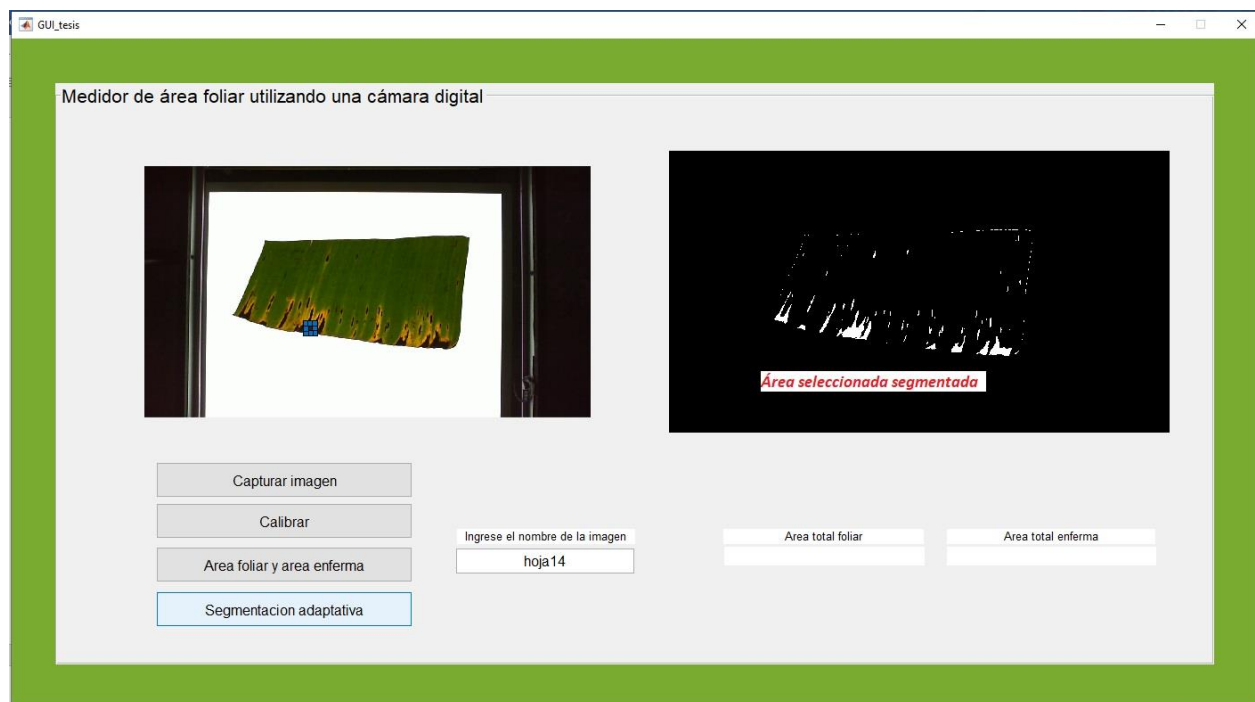


Figura 41 Área seleccionada segmentada en la segmentación adaptativa.

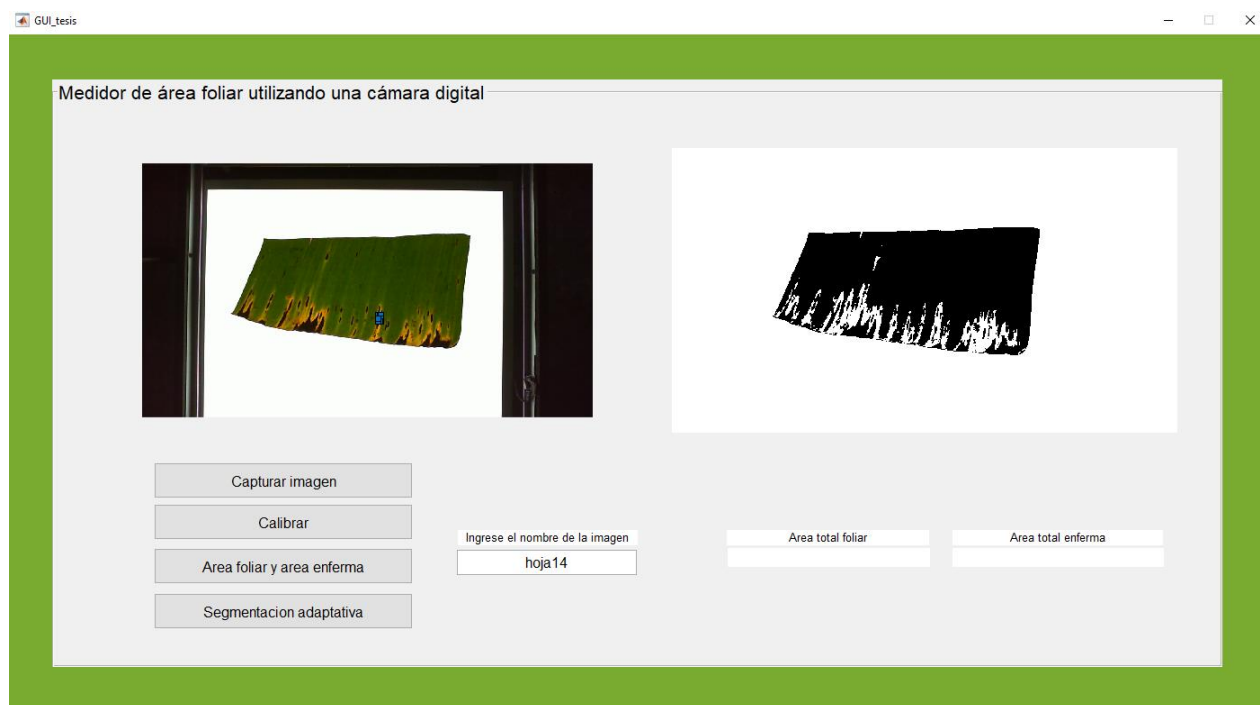


Figura 42 Área seleccionada segmentada en la segmentación adaptativa.

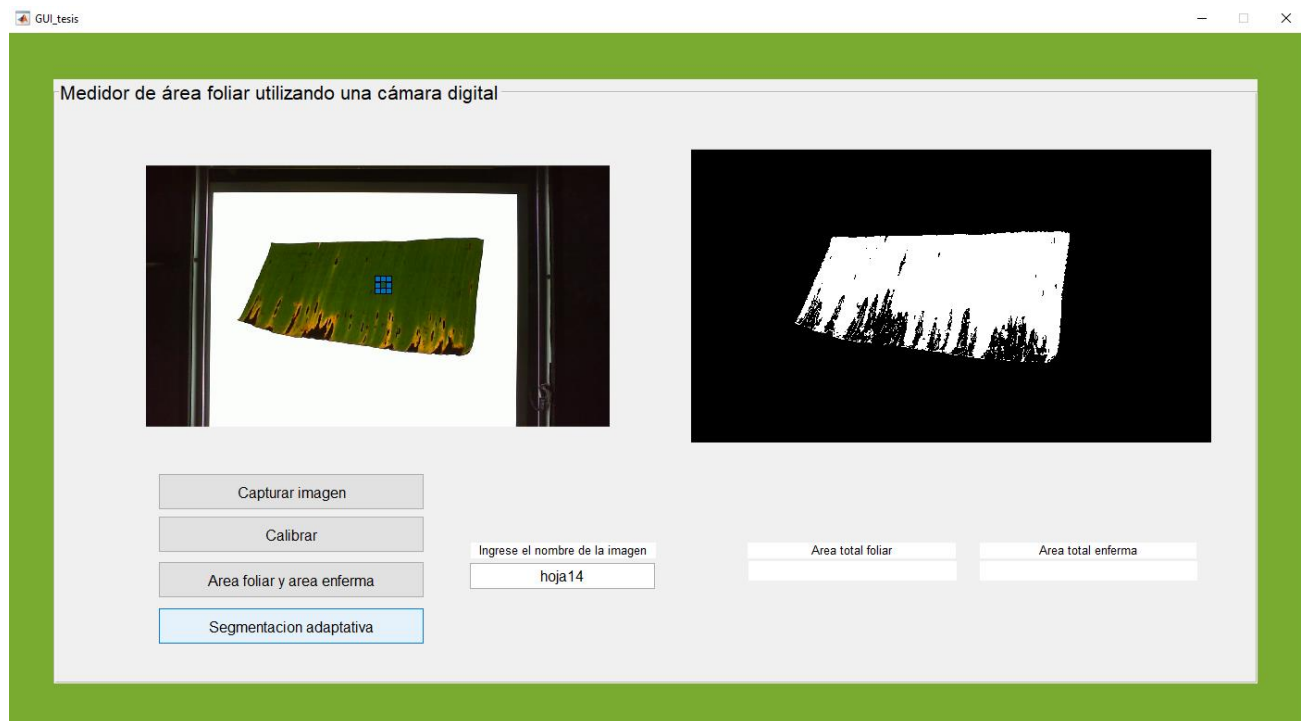


Figura 43 Área seleccionada segmentada en la segmentación adaptativa.

Finalmente, si es deseado segmentar otra área en la hoja de plátano, se procede a realizar de nuevo el proceso mencionado partiendo de volver a pulsar el botón “Segmentación adaptativa”

9. CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó un sistema que permite la captura de una imagen de una hoja con el fin de medir el área foliar, para esto se construyó un sistema mecánico y electrónico el cual facilita la captura de la información. Adicional se desarrolló un software el cual permite la segmentación del área de interés.
- El sistema desarrollado permite medir el área foliar de una hoja de una manera mas sencilla, ya que evita realizar el proceso manual, además, elimina problemas de subjetividad en la medida.
- El algoritmo implementado de segmentación presenta un correcto funcionamiento a la hora de detectar el área de la hoja que se encuentra enferma. Realizando la prueba en diferentes hojas se obtuvo un error promedio de 2.96 ± 1.2 .
- Se comprobó el funcionamiento de la segmentación adaptativa, tomando la misma hoja seleccionando diferentes partes de ella, demostrando que el algoritmo desarrollado permite detectar sigatoka negra, sigatoka amarilla y parte sana.
- El sistema desarrollado se desarrolló de tal manera que pueda ser replicado ya que su funcionamiento es a partir de un microcontrolador y una cámara web. La estructura consta de madera, una lámpara plana led y en general dispositivo que se encuentran fácilmente.
- En el desarrollo e implementación del algoritmo de calibración de la cámara se obtuvieron los parámetros de la cámara web permitiendo así obtener una medida de la imagen, sin embargo, esta presentaba mucho error, por lo tanto, fue necesario implementar una solución de mínimos cuadrados, tomando los píxeles pertenecientes a los cuadros negros del cuadro de ajedrez calculando una transformación que permitió una mejor medida.

10. TRABAJOS FUTUROS

- Desarrollar un sistema de monitoreo por medio de un dron, permitiendo calcular el área foliar de la hoja de plátano remotamente.
- Reducir el tamaño del sistema realizado para facilitar el uso del dispositivo en condiciones reales.
- Desarrollar un aplicativo móvil, que permita realizar el mismo procedimiento de medición.

11. BIBLIOGRAFIA

- [1]. K. Vargas Gaitán. (7 marzo, 2016). La agricultura colombiana en el contexto de la globalización. [Online]. Disponible en: <https://www.elcampesino.co/la-agricultura-colombiana-en-el-contexto-de-la-globalizacion/>.
- [2]. P. Chaudhary, S. Godara, A.N. Cheeran and A. Chaudhari, “Fast and Accurate Method for Leaf Area Measurement”, International Journal of Computer Applications, vol. 49, no. 9, Julio 2012.
- [3]. C. Lü, H. Ren, Y. Zhang and Y. Shen, “Leaf Area Measurement Based on Image Processing,” 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha City, 2010, pp. 580-582.
- [4]. M Cabezas-Gutiérrez, F. Peña, H.W. Duarte, J.F. Colorado, R. Lora Silva, “UN MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÁREA FOLIAR EN TRES ESPECIES FORESTALES DE FORMA NO DESTRUCTIVA”, Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, vol. 12, no. 1, pp. 121-130, 2009.
- [5]. S. Lakshmy Chandran, B. Parveez Shariff, J. Praveen and A. Raghavendra Rao, “Portable Leaf Area Meter: A Review”, IJIREICE, vol. 3, no. 2, pp. 134-136, Febrero 2015.
- [6]. M. Can, O. Gursoy, B. Akcesme and F. B. Akcesme, “Leaf Area Assessment By Image Analysis”, SOUTHEAST EUROPE JOURNAL OF SOFT COMPUTING, pp. 9-10.
- [7]. J. Wang and H. Liu, “Measurement and analysis of plant leaf area based on image processing”, in Proceedings of 2012 International Symposium on Information Technologies in Medicine and Education, Agosto 2012.
- [8]. W. Burger, “Zhang’s Camera Calibration Algorithm”, Technical Report HGB16-05 academic purposes, 2016.
- [9]. U. Buyuksahin, “Vision-Based Sensor Technologies – Webcam: A Multifunction Sensor,” in Comprehensive Materials Processing, Elsevier, 2014, pp. 375-392.
- [10]. T. Acharya and A. K. Ray, Image Processing Principles and Applications, John Wiley & Sons, 2005.
- [11]. D R. Bull, “Digital Picture Formats and Representations,” in Communicating Pictures, Academic Press, 2014, pp. 99-132

- [12]. S. Ravi and K. Am, “Morphological Operations for Image Processing: Understanding and its Applications” in National Conference on VLSI, Signal processing & Communications, (2013).
- [13]. J. Wu, Advances in K-means Clustering: A Data Mining Thinking (Springer Theses: Recognizing Outstanding Ph.D. Research). Springer, 2012. 3.2.1
- [14]. R. A. Franco Luna, Matlab y Arduino (Adquisición de datos), Nov. 11, 2014. Consultado en: Oct. 2019. [Video file]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=9rR3cS70_oA.
- [15]. C. Lakshmy, S. Parveez, J. Praveen, R. Raghavendra, “Portable Leaf Area Meter: A Review” in international journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering, vol. 3, no. 2, February 2015.
- [16]. H. Easlon, A. J. Bloom, “Easy Leaf Area: Automated Digital Image Analysis for Rapid and Accurate Measurement of Leaf Area” in APPS, vol. 2, no. 7, 9 July 2014.
- [17]. D. K. Parmar, Y. R. Ghodasara, K. P. Patel, K. V. Patel and D.R. Kathiriya, “Estimation of Plant Leaf Area using Java Image Processing Techniques”, International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol. 3, no. 2, pp. 848-851, Febrero 2015.
- [18]. N. Rincón Guerrero; M. A. Olarte Quintero y J. C. Pérez Naranjo, “Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional” in Rev. Fac. Nac. Agron. Vol. 65, no. 1, 2012.